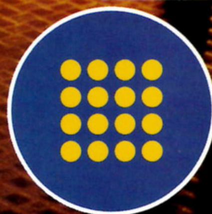


BNFL

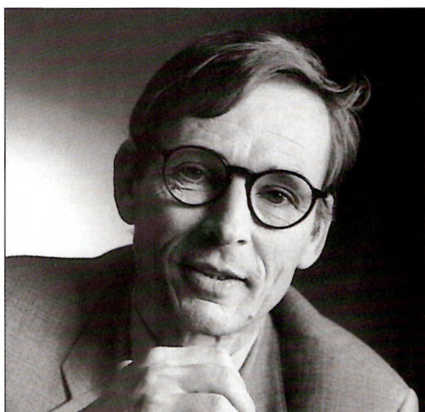
World winning solutions

DES TECHNOLOGIES DE RÉFÉRENCE MONDIALE



C'est avec grand plaisir que je vous présente ce document consacré aux dernières innovations dans les activités de technologie et de recherche, développées au sein du groupe de sociétés BNFL dans le monde.
BNFL a connu quelques changements importants au cours des dernières années. En 1998, Magnox Electric a été intégrée au groupe avec ses centrales nucléaires Magnox situées sur le pourtour du littoral britannique.
Au cours de l'année 1999, nous avons acquis les activités nucléaires de Westinghouse et d'ABB, qui permettent de renforcer notre position aux États-Unis, en Europe et en Asie.
En juillet 1999, le gouvernement britannique a annoncé la création d'un partenariat public-privé (PPP), qui représente pour BNFL une opportunité d'accroître sa marge de manœuvre commerciale, dans un marché où les changements structurels ne cessent de se succéder.
Tous ces changements vont rapprocher BNFL de son objectif : devenir le leader mondial dans le domaine du nucléaire. La disponibilité des technologies de référence, ainsi que les avantages en termes de compétitivité que celles-ci sont susceptibles d'apporter, représentent un autre élément clé pour atteindre cet objectif. Vous pourrez découvrir dans ce magazine de nombreuses innovations, dont certaines pourraient bien constituer les bases de notre activité au cours du siècle à venir.
Toutes ces aspirations sont toutefois étayées par le besoin de conserver les niveaux de sécurité, de santé et de protection de l'environnement les plus élevés. Jean-François Saglio, vice-président de BNFL S.A., précisera l'importance de ces questions pour BNFL, et je suis persuadé qu'à partir du travail décrit dans ce document, vous réaliserez le poids de notre investissement dans la recherche et la technologie, en vue d'atteindre les critères les plus exigeants.
J'espère qu'après lecture, vous aurez appris à connaître BNFL, et que peut-être vous souhaiterez en savoir davantage. Si tel est le cas, n'hésitez pas à prendre contact avec notre bureau français ou avec n'importe quel autre bureau dans le monde.
Même si nous pouvons décrire sur le papier notre large expérience, ainsi que nos technologies, ce sont les personnes travaillant en coulisse qui constituent un réel facteur clé de notre succès futur.
Je suis sûr que lorsque vous les rencontrerez — où que ce soit dans le monde —, vous constaterez que les succès décrits ici ne représentent que la partie émergée de l'iceberg.

JOHN TAYLOR *Chief Executive British Nuclear Fuels Plc.*



En 1996, BNFL a mis en place en France une équipe d'ingénierie spécialisée dans le nucléaire. Ils avaient été formés sur les réacteurs européens en tant qu'assistants techniques au chargement du combustible dans les conteneurs de transport. Le rôle de ces ingénieurs dans les processus d'agrément et de sûreté des transports leur ont permis d'acquérir une grande expérience des spécificités techniques du combustible.
L'une des missions de BNFL France est notamment d'assurer un lien technologique entre les sociétés du groupe BNFL et les correspondants français.
Les requêtes pour obtenir de plus amples informations sur les technologies de BNFL et Westinghouse sont ainsi traitées dans les plus brefs délais par des ingénieurs du cycle du combustible nucléaire, qui ont accès aux chercheurs et ingénieurs du groupe dans le monde entier.
Ce relais technique local est renforcé par Jean-François Saglio, vice-président et éminent scientifique dans les domaines de l'énergie et de l'environnement. Je tiens à remercier les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet qui vise à partager les principales avancées technologiques du groupe BNFL.

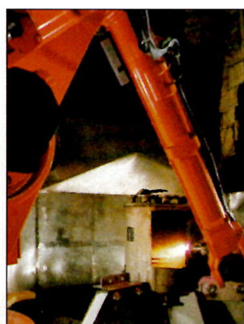
JACQUES-MAXIME AUPETIT *Directeur général BNFL S.A.*



Un tiers du chiffre d'affaires de BNFL provient des activités de Westinghouse.



BNFL mise sur le combustible à oxydes mixtes : le MOX.



La robotique permet de mener des opérations là où les hommes ne peuvent pénétrer.

CE DOCUMENT A ÉTÉ RÉALISÉ PAR

La Recherche

57, RUE DE SEINE
75280 PARIS CEDEX 06
DIRECTEUR DE LA PUBLICATION :
CLAUDE CHERKI

A L'INITIATIVE DE LA SOCIÉTÉ
SELLING MEDIA
DIRECTEUR : ARNAUD CAMUS
5, RUE DE CHAZELLES, 75017 PARIS
TÉL. : 01 47 63 50 50
FAX : 01 47 63 50 52

ET CONÇU PAR
BRITISH NUCLEAR FUELS Plc.
RISLEY, WARRINGTON
CHESHIRE WA3 6AS
TÉL. : +44 (0) 1925 83 20 00
FAX : +44 (0) 1925 82 27 11

DÉPÔT LÉGAL 1er TRIMESTRE 2000
IMPRIMÉ PAR ROTO EURO GRAPH, LAGNY

BNFL : DES TECHNOLOGIES DE RÉFÉRENCE MONDIALE

UNE RÉFÉRENCE POUR L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

4 Les différents métiers de BNFL *par Paul Harding et Debbie Hampton*

8 Le pôle technologique de Sellafield *par N.J. Eccles*

AU CŒUR DES ACTIVITÉS : LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

11 L'enrichissement de l'uranium : des performances inégalées *par Pat Upson*

13 Les enjeux du prolongement de la vie d'une centrale *par Dominique Pujet*

13 Maîtriser le vieillissement des centrales Magnox *par T. Y. Stokoe*

16 Un programme complet pour des centrales plus sûres *par Roger A. Newton, Robert J. McDevitt, Charles E. Meyer, et Theodore A. Meyer*

20 Une nouvelle génération de réacteurs *par Jean-François Saglio*

BNFL OPTIMISE LE RECYCLAGE DU COMBUSTIBLE

24 L'usine Thorp, un projet de grande envergure *par Chris Phillips*

28 Les progrès de la chimie du recyclage *par Chris Phillips*

32 L'alternative du combustible MOX *par Peter Harrington, Paul Cook, David Farrant et Andy Worrall*

34 Le recours à l'automatisation *par Ian Morton et George Burrows*

DÉCHETS NUCLÉAIRES : UNE GESTION EFFICACE

36 Une stratégie globale *par Graham Fairhall et Lindsay Edmiston*

39 Des compétences multiples pour le démantèlement *par Lindsay Edmiston et David Gamberini*

42 Préparer les déchets pour le stockage *par Ed Butcher et Graham Johnson*

46 Des instruments pour détecter la radioactivité *par N. A. Troughton, J.C.B. Simpson, R. D. Gunn et G. Mottershead*

L'AVENIR DE BNFL PASSE PAR LA RECHERCHE

50 Répondre à toutes les demandes de l'industrie nucléaire entretien avec Sue Ion, directrice de la recherche de BNFL

52 Un nouvel outil de la taille d'un cheveu *par Robert Dickson*

53 Le contrôle à distance du combustible usé *par P.T. Singh, J.W. Spencer, J.R. Gibson, et G.R. Jones*

55 Les applications de la robotique dans les centrales nucléaires *par N. Cooke*

Les différents métiers de BNFL

Les activités de BNFL couvrent l'ensemble du cycle du combustible nucléaire en accordant une importance fondamentale aux impératifs de sûreté et de respect de l'environnement. Le personnel et la recherche sont deux clés du succès du groupe

PAUL HARDING, DEBBIE HAMPTON



Le siège de BNFL se trouve à Risley, dans le nord-ouest de l'Angleterre, près de Manchester.

British Nuclear Fuels Plc., ou BNFL, fournit une gamme complète de services liés au cycle du combustible nucléaire : depuis la fabrication du combustible nucléaire destiné aux centrales électriques jusqu'au démantèlement et au nettoyage de sites nucléaires, en passant par la conception de centrales et la production d'électricité. La société compte des clients dans le monde entier.

Au printemps 1999, BNFL a acquis la société américaine Westinghouse Electric Company, spécialisée dans la conception de centrales et dans la fabrication du combustible. Cette opération a considérablement élargi les activités de BNFL en amont du cycle du combustible nucléaire. Celles-ci continueront d'être gérées sous le nom de Westinghouse. Les activités en aval du cycle (recyclage, démantèlement, gestion de déchets…) continueront quant à elles d'être développées sous le nom de BNFL.

Environ un tiers du chiffre d'affaires de BNFL provient des activités de Westinghouse Electric ; un quart provient du recyclage des combustibles usés britanniques et étrangers dans l'usine Thorp ; un autre quart de la fourniture d'électricité par les centrales Magnox. Le reste provient du démantèlement d'installations nucléaires et de la gestion des déchets. Ces secteurs devraient connaître une croissance significative dans les années à venir, en particulier aux Etats-Unis.

De vastes programmes de coopération scientifique et d'information

La protection du personnel et des personnes résidant à proximité des installations, et la sauvegarde de l'environnement sont des préoccupations majeures dans toutes les activités de BNFL. D'importants investissements sont consentis chaque année afin de maintenir les plus hauts niveaux de sécurité et de sûreté radiologique. Le groupe est engagé dans un programme continu d'information ayant pour mot d'ordre la transparence avec les populations avoisinantes. BNFL s'est également engagé dans un programme d'investissements afin de participer activement au développement des économies locales. Le groupe a développé son propre fonds, en partenariat avec des organisations régionales et européennes, pour créer un centre de recherche indépendant, destiné à promouvoir le développement de PME/PMI dans les secteurs technologiques. Parmi les autres initiatives, une coopération à long terme avec l'enseignement primaire, secondaire et supérieur, comprenant la production de documentation, le sponsoring de postes universitaires, et le financement de bourses de recherche ou d'études.

Aujourd'hui, BNFL emploie près de vingt mille personnes dans quinze pays et réalise

PAUL HARDING, DEBBIE HAMPTON
BNFL, Risley.

L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

un chiffre d'affaires de plus de deux milliards de livres (trois milliards d'euros). Le groupe peut apporter son expertise sur l'ensemble des activités ayant trait au cycle du combustible, dans un marché mondial en pleine expansion.

Un rôle central dans l'industrie nucléaire mondiale

La fabrication du combustible et des produits intermédiaires, pour les principaux types de réacteurs en exploitation dans le monde, est assurée par Westinghouse Electric. Son objectif est de concevoir et de développer pour ses clients les produits et les services qui répondent à leurs besoins en termes de réduction de coûts et de fiabilité.
En 1998, Westinghouse a fourni le combustible à l'origine d'un quart de l'électricité produite au Royaume-Uni, et de 8 % de toute l'électricité générée aux Etats-Unis.
Le combustible est fabriqué aux Etats-Unis, dans les usines de Columbia, et au Royaume-Uni, à Springfields. Les procédés mis en œuvre incorporent les dernières technologies en matière d'automatismes. Ils assurent au personnel la meilleure protection radiologique.
Environ 40 % des centrales nucléaires en exploitation dans le monde (c'est-à-dire plus d'une centaine d'unités et, en 1998, dix-neuf des cinquante plus importantes) utilisent les concepts de réacteurs et d'ingénierie développés par Westinghouse. Cette entité de BNFL est l'un des leaders mondiaux dans la conception de réacteurs avancés à eau pressurisée (PWR), et propose aujourd'hui une évolution majeure de son concept avec le réacteur PWR AP600. L'objectif : faire de cette technologie la norme de l'industrie mondiale pour la prochaine génération de centrales nucléaires. Des partenariats avec des clients en Chine, au Japon et en Europe ont été mis en place. Fournisseur de solutions intégrées, Westinghouse développe des systèmes et des mises à niveau pour garantir à ses clients un fonctionnement fiable et rentable, et leur permettre d'exploiter pleinement leurs installations tout au long de leur durée de vie. L'expertise Westinghouse permet d'améliorer continuellement la performance de centrales existantes par l'application de technologies nouvelles.
A Springfields se situe également le centre de production d'hexafluorure d'uranium, destiné à l'enrichissement du combustible nucléaire, c'est-à-dire à la concentration de l'uranium fissile contenu dans le combustible. Cette étape est assurée par Urenco Ltd., une société détenue par BNFL et des partenaires hollandais et allemands, dont le siège est situé à Marlow au Royaume-Uni.
BNFL fournit environ 6 % des besoins en électricité du Royaume-Uni. Cette production d'origine nucléaire permet, en comparaison d'une production équivalente par des centrales au charbon, une réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) supérieure à 22 millions de tonnes. A titre de comparaison, on obtiendrait un gain similaire en arrêtant tout le trafic routier britannique une journée par semaine. De plus, les centrales BNFL permettent, toujours en comparaison des centrales au charbon, d'éviter le rejet annuel dans l'atmosphère d'environ 150 000 tonnes de dioxyde de soufre et de 45 000 tonnes d'oxydes d'azote — gaz responsables, entre autres, des pluies acides.
BNFL exploite huit centrales nucléaires de type Magnox et une centrale hydroélectrique. Certaines centrales Magnox fonctionnent depuis plus de quarante ans, en toute sécurité et de façon parfaitement fiable. Elles produisent annuellement quelque 23 térawatt heures d'électricité, soit les besoins de Londres et de ses environs.
De même que pour l'ensemble des activités du groupe, la sûreté est la première priorité dans l'exploitation des centrales électriques. Des efforts considérables sont également menés en faveur de l'environnement. Les populations résidant autour des sites sont protégées par l'application de normes radiologiques et de contrôles environnementaux très stricts.
BNFL fabrique des assemblages de combustibles à oxydes mixtes MOX. Une petite unité (MDF) est en exploitation sur notre site de Sellafield, dans le nord-ouest de l'Angleterre, depuis 1993. Elle a déjà permis de répondre à la demande de clients suisses, allemands et japonais. Présentant un haut rendement, le MOX est utilisé dans quelque 37 centrales de production d'électricité dans le monde. Une nouvelle unité

INVESTIR DANS LES SCIENTIFIQUES DE DEMAIN

Les scientifiques de demain sont aussi importants aux yeux de BNFL que les scientifiques d'aujourd'hui. BNFL investit beaucoup de temps et de ressources pour assurer des liens forts et durables avec la communauté scientifique et le monde de l'enseignement. C'est la raison pour laquelle BNFL recrute des enseignants qui apportent leur conseil dans le domaine des supports pédagogiques et prennent part à l'élaboration de ces derniers.

Au Royaume-Uni, BNFL a développé un important programme de soutien éducatif pour l'enseignement de la science et de la technologie au niveau scolaire, et parraine un « défi scientifique » national, destiné à impliquer plus de cent mille jeunes dans les projets de recherche relatifs aux programmes d'enseignement.

Depuis plusieurs années maintenant, BNFL soutient un projet scientifique impliquant les écoles de la zone de Dunkerque, dans le Nord de la France. Dans cette ville se trouve le port emprunté pour les expéditions de combustible nucléaire usé en provenance des clients européens vers l'usine de recyclage de BNFL, située à Sellafield.

Westlakes Research Limited, un parc scientifique de haute technologie qui se compose d'une société d'études scientifiques employant plus de soixante-dix techniciens et d'un centre international de troisième cycle, a été établi à quelques kilomètres de Sellafield. Westlakes, spécialisé dans les domaines de la science environnementale, la biotechnologie, la génétique et l'épidémiologie, fournit des données liées à la recherche scientifique et analytique à BNFL, ainsi qu'aux autres industries.

BNFL dépense actuellement environ 2,5 millions de livres (environ 3,8 millions d'euros) par an sur quatre-vingt-dix contrats dans plus de trente universités. Les thèmes de recherche sont divers : explosions de gaz dans les conduites, physique statistique ou applications des acides hydroxamiques. BNFL cherche aujourd'hui à rationaliser ses contrats, en travaillant avec un nombre plus restreint d'universités, et à obtenir un meilleur rendement.

Pour cela, un centre d'excellence en radiochimie a été ouvert au sein du département de chimie de l'université de Manchester. BNFL y investit deux millions de livres (environ 3,1 millions d'euros) sur cinq ans en personnel de recherche et bourses d'études. L'université de Manchester assurera la pérennité du centre. Les recherches qui y sont menées vont de la séparation des produits de fission en milieu acide à l'étude de la structure et du comportement des actinides, en passant par la biogéochimie des radioéléments, ou l'étude du comportement de l'iode dans les matrices des composants destinés au stockage. Outre la contribution scientifique dont bénéficiera BNFL, ce centre permettra le rétablissement de la radiochimie, discipline actuellement en déclin dans les universités britanniques.

BNFL étudie actuellement les possibilités de création de centres d'excellence dans d'autres disciplines telles que l'étude des poudres ou les essais non destructifs. Dans d'autres domaines, il peut paraître plus évident de soutenir les infrastructures existantes.

Chris Squire, BNFL Sellafield

UNE ATTRACTION POUR APPRENDRE

On pourrait penser qu'un lieu destiné au public et créé à coups de millions de livres dans un endroit retiré du nord-ouest de l'Angleterre est une entreprise téméraire. Mais après onze ans durant lesquels il a reçu 1,6 million de visiteurs, le centre d'information du public de Sellafield, situé le long de l'usine de recyclage de BNFL, est un succès. Pour quelles raisons ?

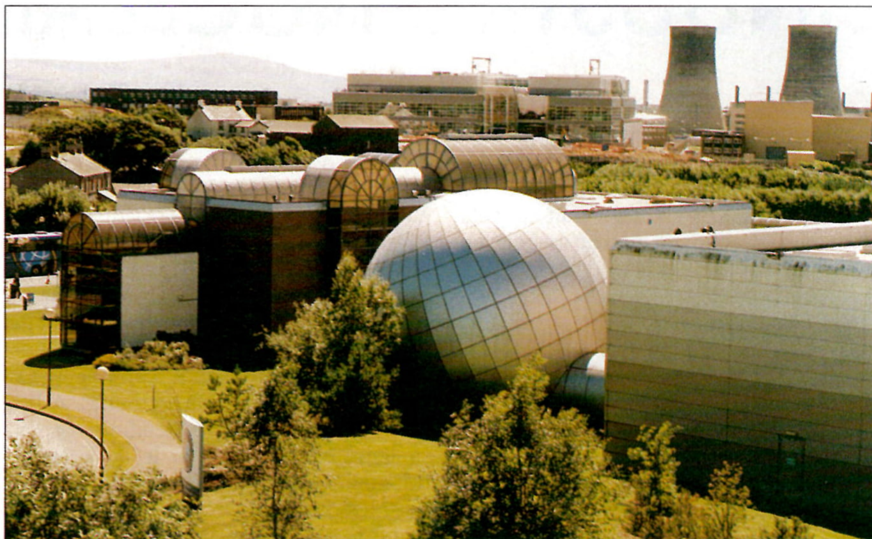
Le centre n'est pas perçu par les visiteurs comme un lieu vantant les mérites du nucléaire, mais comme une attraction touristique et ludique.

Son entrée est gratuite. Construit en 1988 pour 5 millions de livres sterling et inauguré par Son Altesse Royale le prince Philip, il a été rénové en 1995 à grands frais (5 millions de livres). Réparti sur trois bâtiments d'une surface totale de 3 500 m^2, il comprend de nombreuses présentations conçues par des décorateurs de théâtre. Il emploie vingt-quatre chargés d'information qui accueillent le public sept jours sur sept. Le centre est très didactique, avec des écrans et des présentations qui demandent la participation du public. Il tend à faire passer des messages simples, conçus pour des adolescents.

Parallèlement, BNFL a lancé une campagne de relations publiques avec pour mots d'ordre : transparence et honnêteté. Les 250 hectares du site de Sellafield sont accessibles à tous : deux autocars, les « Sellafield Siteseers », sont à disposition des visiteurs pour un tour de quarante-cinq minutes. Ainsi, chaque année, 10 000 personnes, parmi les 150 000 visiteurs, utilisent ce service.

Beaucoup reviennent régulièrement.

R.R. Marshall, directeur des relations publiques, Sellafield.



Pensé pour être ludique, le centre d'information est avant tout didactique et, avec plus de 150 000 visiteurs par an, il est devenu la première attraction touristique de la région.



de production, en cours de mise en service, permettra à BNFL de répondre aux besoins de cet important marché international, actuellement en plein croissance.

BNFL propose des solutions complètes pour le recyclage du combustible nucléaire usé à de nombreux clients de par le monde. L'uranium et le plutonium que contient une tonne de combustible nucléaire brûlé dans une centrale moderne peuvent fournir autant d'énergie que 100 000 barils de pétrole. Aussi, le recyclage est mis en œuvre, de façon sûre et économique, depuis trente-cinq ans. BNFL a investi plus de 2,85 milliards de livres (plus de 4,36 milliards d'euros) dans son usine de traitement des déchets, Thorp (Thermal Oxyde Reprocessing Plant). Mise en service en 1994, avec un carnet de commande dont le montant des contrats dépassait 12 milliards de livres (environ 18 milliards d'euros), elle emploie aujourd'hui quelque 2 000 personnes. Thorp, dont, rappelons-le, les activités génèrent un quart du chiffre d'affaires du groupe, est un exportateur européen majeur.

BNFL a développé un grand nombre de technologies pour répondre aux besoins de ses clients actuels et futurs en matière de nettoyage de sites et de gestion de déchets. Les exploitants de nombreuses centrales nucléaires de par le monde ont décidé d'entreposer leur combustible usé dans l'attente de prendre une décision quant à leur traitement. BNFL Fuel Solutions propose des méthodes pour entreposer les combustibles durant des périodes prolongées, en toute sécurité, au moyen de produits et de solutions de haute technologie.

Une grande expérience de la gestion des déchets

La demande d'expertise pour la gestion de déchets et le démantèlement d'installations nucléaires s'est considérablement accrue au cours des dix dernières années. Ces opérations constituent une part croissante des activités de BNFL. Actuellement, environ 10 % du chiffre d'affaires du groupe provient des opérations de nettoyage de sites nucléaires.

Chaque année, le Royaume-Uni produit environ 40 millions de m^3 de déchets industriels, à comparer aux quelque 20 000 m^3 de déchets nucléaires. Depuis 1976, tout nouveau contrat de recyclage de combustible usé en provenance d'un client étranger prévoit le retour des déchets.

Ayant investi, au cours des dix dernières années, plus de deux milliards de livres (trois milliards d'euros) dans des installations de traitement de déchets pour son site de Sellafield, et poursuivant sans cesse son programme d'investissement en recherche et développement (R&D), BNFL peut aujourd'hui faire bénéficier ses clients d'un ensemble de solutions et de technologies fondées sur sa propre expérience.

Le groupe est devenu par ailleurs un leader sur le marché mondial du démantèlement, apportant des solutions nouvelles en termes de protection de l'environnement. Lorsque les installations nucléaires arrivent en fin de vie, elles sont soit démantelées soit déconstruites. Le démantèlement est le processus qui vise à faire revenir un site à son état originel pour le rendre exploitable à d'autres fins. Cela implique l'enlèvement et le traitement de toute matière nucléaire résiduelle, la décontamination, et le conditionnement ou le recyclage des déchets. Variante du démantèlement, la « déconstruction » est une opération similaire, mais dont la finalité est la reconstruction d'infrastructures venant remplacer les anciennes.

Depuis le début des années 1980, BNFL a réalisé trente-huit projets de démantèlement sur son site de Sellafield. Le savoir-faire ainsi acquis a permis au groupe de se positionner sur ce marché, non seulement au Royaume-Uni, mais également en Europe de l'Ouest et aux Etats-Unis. BNFL Inc., société américaine du groupe, a saisi des opportunités substantielles sur le marché américain, et devra jouer un rôle croissant dans le développement de ce secteur. BNFL apporte également son soutien à l'Ukraine et à la Russie dans un certain nombre de projets de nettoyage de sites, notamment celui de Tchernobyl.

Une logistique de transport pensée pour la sûreté

Le transport des combustibles nucléaires usés et des produits issus du recyclage constitue une des activités clés du groupe. BNFL assure également le transport et la livraison des combustibles à oxyde mixte MOX, et possède plus de trente années d'expérience dans le transport de plutonium, sous diverses formes, aussi bien par la route que par voie ferroviaire, aérienne ou maritime.
BNFL, qui exploite le plus important réseau de transport de matières radioactives, jouit en ce domaine d'une réputation mondiale en termes de qualité et de sûreté. Deux terminaux maritimes y sont dédiés : l'un à Barrow-in-Furness, au Royaume-Uni, et l'autre à Dunkerque. Ils constituent des éléments clés du dispositif de transport.
Au travers de Pacific Nuclear Transport Ltd. (PNTL), autre société du groupe, BNFL exploite une flotte de cinq navires, spécialement conçus pour livrer le combustible usé depuis le Japon jusqu'à l'usine de recyclage BNFL à Sellafield, ou à celle de Cogema à Cap-La Hague en France. PNTL assure également le retour des déchets vitrifiés de haute activité, depuis l'Europe vers le Japon. En plus de cette flotte, BNFL exploite un sixième navire dédié spécialement aux transports européens.

LE SITE INTERNET BNFL

En septembre 1997, BNFL a relancé son site Internet. Pour Janine Claber, son succès repose, entre autres, sur l'usage des dernières technologies disponibles, comme le modèle VRML (Virtual Reality Modelling Language) appliqué aux abords du centre d'information du public à Sellafield.

L'objectif principal est de présenter le potentiel de BNFL dans les domaines scientifiques et techniques, son expérience et son savoir-faire uniques.

Depuis son lancement, le site a été visité par plus de six millions de personnes. Il est l'un des outils majeurs de communication de la société.

HTTP://WWW.BNFL.COM

Les six navires sont classés INF3 selon le règlement de l'organisation maritime internationale : le classement de sûreté le plus élevé qui soit pour les navires transportant des matières radioactives. Ils bénéficient d'équipements en matière de sûreté qui sont sans comparaison avec les caractéristiques d'un cargo conventionnel : double systèmes de propulsion ; espaces cargo séparés avec protection radiologique ; redondance des systèmes de navigation, de lutte incendie, des systèmes électriques et de communications ; double coque avec renforcement anticollision ; double structure de fond. L'ensemble de ces caractéristiques en font « un navire dans un navire ». De plus, ils sont armés par un équipage d'officiers et de marins britanniques plus nombreux que dans un cargo conventionnel de taille équivalente.
Une autre société du groupe, Direct Rail Services (DRS), est devenu le premier transporteur britannique de grandes quantités de matières radioactives par chemin de fer. DRS, en exploitation commerciale depuis 1996, fut créée pour apporter à BNFL une capacité de transport ferroviaire après la privatisation du réseau ferroviaire britannique. Par le biais de cette société, BNFL assure le transport de combustibles usés, de déchets radioactifs de faible activité, et même de matières chimiques.
Depuis plus de quarante ans, BNFL conçoit et construit des usines pour toutes les phases du cycle du combustible nucléaire. Riche de cette expérience, le groupe propose ses capacités en technologie et en ingénierie pour un large éventail de services, depuis l'étude de faisabilité jusqu'à l'usine « clés en main ».
Aujourd'hui, sa capacité à anticiper et à répondre spontanément aux changements de l'industrie résulte largement d'une politique du groupe en matière de R&D. BNFL recrute parmi les meilleurs chercheurs et thésards, et maintient de solides liens avec les organisations scientifiques, les universités et les centres de recherche britanniques et étrangers. Un nouveau centre technologique, le BNFL Technology Centre (BTC) à Sellafield, témoigne de l'engagement du groupe BNFL et lui permettra de poursuivre dans les meilleures conditions ses recherches sur les solutions technologiques nucléaires.
BNFL adhère au programme américain OSHA (American Occupational Safety and Health Administration Recording System) de mesure de l'hygiène et de la sécurité sur les lieux de travail. Tous les sites de BNFL sont examinés et validés par la NII (Nuclear Installations Inspectorate) au Royaume-Uni, et par la NRC (Nuclear Regulatory Commission) aux Etats-Unis. Toutes les activités du groupe, depuis la conception jusqu'au démantèlement, sont auditées régulièrement afin de s'assurer de leur conformité aux critères de sécurité et de protection de l'environnement.
L'industrie nucléaire est l'industrie la plus réglementée au monde. Des milliers d'échantillons sont prélevés chaque année dans l'environnement et analysés.
Signalons que l'industrie nucléaire britannique contribue aujourd'hui à moins de 0,1 % du rayonnement annuel reçu par la population du Royaume-Uni.
Pour BNFL, ce sont avant tout les quelque 20 000 personnes du groupe, leur expérience, leur savoir-faire qui constituent une des ressources les plus importantes du groupe. BNFL tient à leur offrir en permanence des perspectives d'évolution à l'aide d'un système d'évaluation des besoins en compétences techniques et humaines, ainsi que d'un vaste programme de formation. Un centre de recrutement universitaire a été mis en place pour le Royaume-Uni, et sera prochainement étendu pour acquérir une portée internationale. ■



Mise en service en 1994, l'usine Thorp de recyclage des combustibles usés représente aujourd'hui un quart du chiffre d'affaires du groupe.

Le pôle technologique de Sellafield

BNFL porte une très grande attention à ses ressources humaines. Pour que son personnel puisse travailler dans un environnement propice à l'éclosion de l'innovation, BNFL a décidé de construire un nouveau pôle technologique à Sellafield. Il est destiné à la poursuite de l'exploitation commerciale des technologies développées par le groupe.

N.J. ECCLES

BNFL propose une gamme de services complète en relation avec le cycle du combustible nucléaire, et s'est engagée à développer ses activités commerciales à l'échelle mondiale. Ce projet lui permettra non seulement d'étendre ses domaines d'activité existants, mais également de créer de nouveaux débouchés commerciaux, associés notamment à la partie « terminale » du cycle du combustible. Les défis techniques liés à la réalisation d'un nouveau pôle technologique nécessitent la participation d'un personnel spécialisé dans la Recherche et la Technologie (R&T).

La société a effectué un investissement substantiel (127,5 M£, soit environ 195 millions d'euros) dans cette nouvelle installation de R&T, le BTC ou BNFL Technology Centre. Il complétera les autres installations récentes de R&T de la société, au nord-ouest de l'Angleterre : à Springfields et Capenhurst. En outre, intégré au site existant de Sellafield, il fournira un soutien technique aux usines. Il se consacrera également à des activités de R&T à long terme pour satisfaire les besoins de développement futurs de la société. La construction de l'installation est aujourd'hui bien avancée, et son exploitation débutera dans le courant de cette année.



Près de 200 millions d'euros ont été investis pour réaliser ce nouveau centre, dont l'exploitation est en cours de démarrage.

L'équipe de conception du BTC a bénéficié d'une collaboration étroite avec les futurs utilisateurs du centre et, dans certains cas, de l'appui de consultants externes. Dès le lancement du projet, l'un des facteurs déterminants a été la nécessité d'élaborer un bâtiment sûr, « convivial », qui favoriserait une interaction quotidienne entre les scientifiques, stimulant ainsi un échange d'idées entre les différentes disciplines représentées. Un autre point essentiel a été de concevoir une installation suffisamment modulable, pour pouvoir répondre aux besoins de fonctionnement pendant plus de trente ans. Les laboratoires sont donc construits sur une base flexible, permettant de substituer un type de module à un autre selon les besoins des projets en cours. Des techniques de modélisation par ordinateur et des tests de salle en grandeur nature ont été utilisés pour optimiser la taille des modules de laboratoire. De nombreuses études préalables ont été menées de façon à éliminer le risque de concevoir une installation démesurée, et à assurer un bon rapport valeur/coût. Des évaluations des risques ont été entreprises et continuent d'être menées à toutes les étapes du projet.

Un bâtiment de faible coût opérationnel pour une R&T de haute qualité

Une importance significative a été accordée à la phase de conception afin que celle-ci n'exclut pas un développement futur. Un espace suffisant a été conservé sur le site pour pouvoir aussi bien étendre les laboratoires que les bureaux. En faisant appel à des consultants ayant fait leurs preuves dans la conception d'installations modernes de R&T, BNFL s'est assuré d'intégrer les plus récentes pratiques en cours dans le domaine industriel. Le résultat est un bâtiment de faible coût opérationnel, qui contribuera fortement au maintien d'une activité de R&T de haute qualité.

L'architecture du BTC a été conçue de façon à donner un bâtiment compact. Une planification minutieuse des itinéraires de circulation a contribué à cette volonté, tout en assurant une grande efficacité d'exploitation. Dans la mesure du possible, les laboratoires et les bureaux ne sont pas cloisonnés, afin d'augmenter l'interaction entre les membres du personnel et améliorer la flexibilité à long terme. Les photocopieurs, les distributeurs automatiques, les installations destinées aux conférences, les bibliothèques, ont été positionnés de façon centrale, dans l'atrium, pour favoriser également cette interaction.

Une attention particulière, en matière de sécurité, a été portée afin de séparer autant que possible les mouvements des personnes des itinéraires de déplacement de matériels, tout en maintenant les distances de déplacement des matériels lourds et encombrants à une valeur minimale. Les salles où du matériel encombrant sera acheminé sont donc positionnées à proximité des sorties.

Les laboratoires intégrés au BTC se composeront de cellules hautement actives

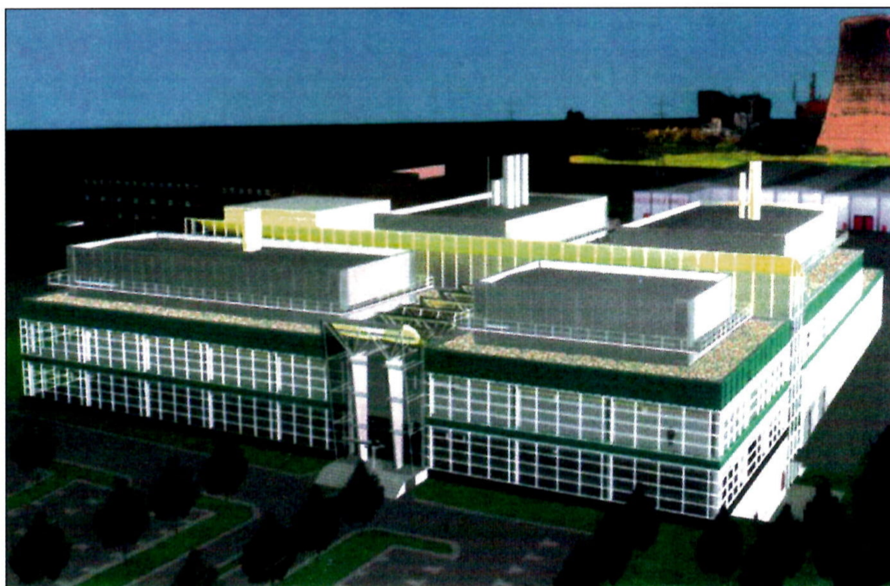
N.J. ECCLES
BNFL, Sellafield.

alpha/bêta/gamma (α/β/γ), de laboratoires pour travaux hautement actifs, de laboratoires faiblement actifs et non actifs, d'une salle d'essais liés à l'uranium, ainsi que d'infrastructures secondaires répondant aux aspirations de quelque trois cents scientifiques et du personnel auxiliaire qui y travailleront. Le BTC s'intégrera dans les installations existantes de génie chimique et de mécanique générale. Ensemble, ils constitueront un complexe de R&T pour fournir une assistance à la totalité des exploitations du cycle du combustible nucléaire. Parmi les études qui y seront approfondies, on peut citer :

- le recyclage du combustible métallique et du combustible à oxydes ;
- la vitrification des déchets de haute activité ;
- le traitement et le stockage des déchets d'activité intermédiaire ;
- l'évacuation des déchets de faible activité ;
- la production du combustible à oxydes mixtes MOX ;
- la décontamination et la déconstruction.

Les cellules hautement actives, ou cellules HA, seront utilisées pour le travail préparatoire des matières actives à rayonnement α/β/γ et neutronique (n). Ces cellules consisteront en un nombre bien déterminé d'environnements de travail, chacun possédant son propre cadre de confinement. Un bouclier biologique sera fourni par la structure principale en béton, dans laquelle les cadres de confinement seront intégrés. A l'intérieur des cellules HA, les opérations seront effectuées à distance, grâce à des manipulateurs et pourront être visualisées à travers des hublots. Les activités de recherche fondamentale et de développement pourront être ainsi entreprises de manière sûre avec une large gamme de matières radioactives. Elles s'étendront du développement des techniques de décontamination à celui du traitement des déchets récupérés dans les usines de recyclage.

La plus grande surface fonctionnelle du BTC sera occupée par les laboratoires, qui consisteront en une série de modules groupés. Chaque module est une station de travail monoposte de taille variable, dont la configuration peut être adaptée selon les besoins avec un banc de travail, des hottes, ou une boîte à gants. Elle pourra être modifiée aisément selon les exigences des différents types de projets de recherche à venir.



Les modélisations par ordinateur ont permis d'optimiser la taille du bâtiment et des laboratoires.

Favoriser les interactions entre les différentes disciplines scientifiques

Afin de créer un environnement de travail lumineux et esthétique, l'utilisation de la lumière naturelle sera optimisée au moyen de larges vitrages intégrés au bâtiment. Les laboratoires ont été conçus de la manière la plus ouverte possible, en tenant compte des différentes contraintes de sécurité : aération, protections contre les incendies... Cette approche facilitera l'interaction entre les différentes disciplines scientifiques en prévenant la formation traditionnelle de petites zones de travail isolées.

Des laboratoires destinés aussi bien à la manipulation de matières actives que non actives ont été intégrés dans la conception du BTC. Dans les laboratoires actifs alpha, des modules de boîte à gants pour le confinement des matières irradiantes seront installés, de même que des modules de hotte destinés uniquement aux travaux auxiliaires. Les boîtes à gants présenteront différents degrés de protection biologique selon les niveaux de rayonnement bêta et gamma associés. Le travail de recherche relatif au plutonium et au MOX sera notamment effectué dans ces laboratoires.



Tout en intégrant l'ensemble des contraintes liées à la sécurité, les laboratoires sont conçus pour être le plus ouverts possible.

La salle d'essais actifs liés à l'uranium pourra intégrer de grands montages destinés aux expérimentations. Elle comprendra par exemple une tour de 25 mètres. La salle sera composée d'une zone de stockage, d'ateliers, et d'une série de zones où les montages expérimentaux pourront être installés. Ces derniers seront généralement construits à l'extérieur du site, au sein de conteneurs ISO qui seront aisément transportables.

Etant donné le haut niveau d'entretien requis par le BTC, l'ensemble des distributions et des alimentations est disposé dans des espaces aménagés entre les étages. Ce type de distribution a l'avantage de permettre une maintenance aisée et un potentiel de flexibilité accru. L'augmentation initiale des investissements sera compensée par des coûts moins élevés de maintenance et de distribution.

La conception de l'aération répond à la classification radiologique des zones à l'intérieur du BTC. Une pleine utilisation des flux par un système de cascade, à partir des zones propres jusqu'aux zones potentiellement contaminées, est assurée afin de maintenir le confinement, et d'optimiser la consommation d'énergie.

Enfin, dans le but de réduire la quantité de documents qu'auront à manipuler les chercheurs et de favoriser la communication au sein du BTC, le réseau interne fera appel aux dernières évolutions des technologies de l'information. ■

AU CŒUR DES ACTIVITÉS :



Un challenge majeur

Filiale de British Nuclear Fuels Plc., BNFL SA a été fondée en 1996, d'abord pour assurer le transport en France de combustibles neufs ou usés des clients européens de BNFL, mais aussi pour faciliter et développer les contacts techniques et commerciaux avec les principaux acteurs de l'industrie nucléaire. BNFL S.A. a pu trouver d'emblée une équipe déjà aguerrie dans ces questions, tant au regard de la technique, de l'économie et de l'organisation, que pour la sûreté et la protection de l'environnement, lesquelles sont, avec la protection de la santé, des axes d'actions majeurs de la société.

C'est ainsi qu'aujourd'hui, le taux de fréquence des accidents entraînant un arrêt de travail est, à BNFL, inférieur à la moitié du taux moyen constaté dans l'industrie chimique anglaise. Pour poursuivre cette politique, les efforts d'amélioration de la sécurité conduisent à se fixer des objectifs de réduction de plus du tiers du taux actuel à très court terme.

En matière de protection contre les radiations ionisantes, alors que l'obligation légale est de ne pas dépasser le taux d'irradiation de 0,5 mSv par an pour les employés, l'objectif interne de 0,15 mSv par an pour tout agent ou sous-traitant a été atteint en 1998 ; la dose limite fixée par les règles internes de BNFL à 0,2 mSv est donc largement respectée. Ces résultats ont été obtenus par une combinaison d'investissements, nouveaux en production, par l'amélioration des pratiques opératoires et par une meilleure formation des agents et contractants.

Au regard de la protection de l'environnement, il suffit d'indiquer que tous les sites de production de BNFL sont aujourd'hui certifiés ISO 14001.

Un challenge majeur apparaît dans ce domaine : celui de l'application aux rejets de ces sites des recommandations de la convention OSPAR (Convention d'Oslo et de Paris, pour la protection du Nord-Est de l'Atlantique, de la mer du Nord et de la mer d'Irlande contre la pollution). Les rejets radioactifs qui respectent aujourd'hui largement les limites réglementaires devront, selon le protocole de Sintra adopté par le Royaume-Uni, tendre vers zéro en 2020.

L'engagement de BNFL dans ces domaines, démontré par les progrès d'ores et déjà réalisés, trouvera dans l'avenir à s'exprimer au travers de l'amélioration continue de ses performances.

JEAN-FRANÇOIS SAGLIO *vice-président de BNFL S.A.*

L'enrichissement de l'uranium : des performances inégalées

L'enrichissement de l'uranium est une étape clé de la préparation du combustible nucléaire. Urenco développe depuis 25 ans des technologies qui permettent de bénéficier de rendements accrus. Les centrifugeuses représentent aujourd'hui un outil aux performances inégalées.

PAT UPSON

Avant d'être introduit dans le cœur d'une centrale nucléaire, le combustible doit être préparé : les centrales utilisent généralement un combustible contenant 3 % à 5 % d'isotope 235 de l'uranium (^{235}U), alors que le minerai dont il est extrait n'en contient que 0,7 %. L'« enrichissement » de l'uranium est une étape essentielle dans la production du combustible. Le principe est de séparer le minerai en deux fractions, l'une enrichie en isotope fissile ^{235}U et, l'autre, résiduelle, appauvrie en ^{235}U.

Les premiers travaux sur l'enrichissement avaient pour objectif d'atteindre des teneurs très élevées en ^{235}U, car la séparation isotopique de l'uranium a joué un rôle clé dans le développement des premières armes nucléaires (projet Manhattan). De nombreux procédés physiques ont alors été développés en parallèle : diffusion gazeuse, centrifugeuses à gaz, séparation électromagnétique, et même des procédés chimiques.



Dans une usine Urenco, les centrifugeuses sont installées en cascade afin d'obtenir le degré d'enrichissement souhaité.

Une réussite incontestée des programmes de développement

Le premier programme militaire nord-américain utilisait le procédé électromagnétique, mais, limité par de très faibles rendements, il fut abandonné au profit de la diffusion gazeuse. Afin de faire face à la forte augmentation des besoins en combustible nucléaire pour la production civile d'électricité, et pour répondre à une demande commerciale, les seuls procédés envisageables étaient la diffusion gazeuse et les centrifugeuses rapides à gaz. Les recherches sur les nouvelles technologies se sont orientées quant à elles vers la technologie laser.

En raison de son expérience dans ces trois domaines, le groupe Urenco occupe une position unique sur ce marché. En Grande-Bretagne, Urenco Capenhurst s'est développé grâce aux installations d'enrichissement de BNFL, qui bénéficient elles-mêmes de plusieurs décennies d'expérience en matière de diffusion gazeuse. Les usines Urenco du Royaume-Uni, des Pays-Bas et d'Allemagne assurent depuis vingt-cinq ans l'exploitation commerciale des centrifugeuses rapides à gaz.

Au début des années 1980, Urenco a lancé un important programme de développement sur les éventuels procédés d'enrichissement par laser. En 1993, après dix années de recherche et plus de 200 millions de livres sterling (environ 310 millions d'euros) d'investissements, Urenco a conclu que, d'un point de vue économique, la technologie d'enrichissement par laser n'était pas capable de rivaliser avec celle des centrifugeuses à gaz. D'où la décision de mettre un terme à son programme de développement. En juin 1999, le numéro un du marché de l'enrichissement, US Enrichment Co, annonçait également l'arrêt de son programme laser pour des raisons techniques et économiques, indiquant que ses installations de diffusion vieillissantes seraient probablement remplacées par des centrifugeuses à gaz. Vingt-cinq ans après son lancement, la réussite de ce programme de développement mené par Urenco, qui a vu naître six générations d'appareils, n'est plus contestée.

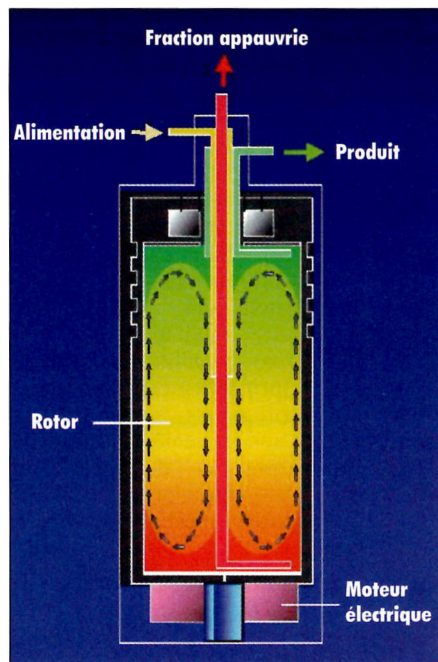
Des hausses de rendements permis par l'usage de nouveaux matériaux

Quel est le principe d'une centrifugeuse ? Il repose sur la différence de masse entre les deux fractions d'uranium séparées. La fraction enrichie en ^{235}U, plus légère, est recueillie dans la partie supérieure de l'appareil (schéma page suivante). Chaque machine n'amenant qu'à un faible degré d'enrichissement, les unités sont constituées de plusieurs centaines de machines reliées en « cascade » dans les usines.

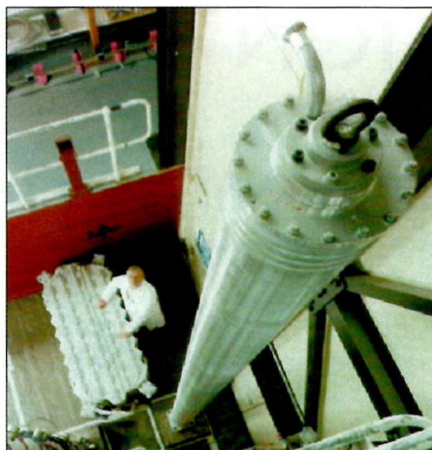
Le facteur de séparation d'une centrifugeuse est fonction de sa vitesse de rotation et de la longueur du rotor, aussi, les tra-

PAT UPSON
Technical,
Urenco Ltd.

vaux de développement ont abouti à des machines plus rapides et de taille accrue.
L'évolution des machines est principalement régie par l'amélioration des matériaux disponibles pour leur conception, en termes de poids et de solidité. Ainsi, après avoir renforcé les rotors métalliques par des matériaux composites, Urenco conçoit aujourd'hui des rotors intégralement composites.
Chaque nouvelle génération de centrifugeuses s'est accompagnée d'une hausse de rendement. Ainsi, la puissance consommée par unité produite a considérablement diminué. En effet, bien que toujours plus grandes, les générations successives requièrent une puissance similaire car, dans les conditions de vide poussé, la résistance aux vitesses élevées est faible. Par ailleurs, l'amélioration du rendement a permis une baisse des capitaux investis par Urenco dans les modules de ses usines .
Pour garantir le succès de la mise en service industrielle de chaque nouvelle génération, un programme de développement et de qualification très précis a été mis en place. Le premier stade de ce programme vise à passer en revue un large éventail de



Vue simplifiée d'une machine Urenco. Le rotor tourne à très grande vitesse sur un axe d'articulation, dans des conditions de vide poussé. L'uranium, préalablement transformé en hexafluorure d'uranium gazeux dans des installations de conversion, est introduit au niveau de l'axe du rotor en rotation. Une pelle fixe située sur le haut du rotor recueille l'uranium enrichi ; la pelle située près du fond recueille les rejets d'uranium appauvri.

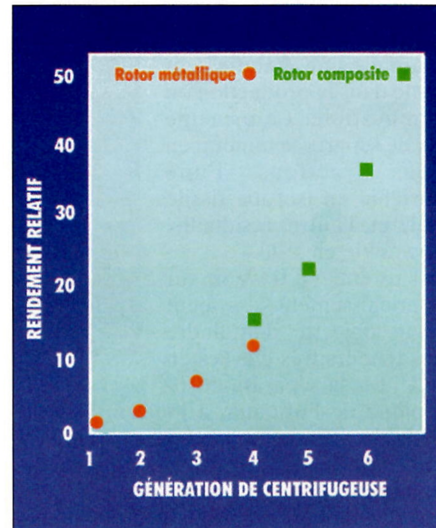


La hausse de rendement de chaque génération de centrifugeuses a été rendue possible par une augmentation sensible de leur taille.

dimensionnements pour les matériaux et à formuler un concept adapté aux contraintes commerciales. Le second stade correspond à la phase principale de recherche et de développement. Il comporte des études théoriques, des études de conception, des tests de matériaux, la fabrication et l'essai en rotation de quelques composants, et enfin la construction et la validation de plusieurs centrifugeuses.

Des résultats dépassant largement les espérances

Il n'est pas rare que cette phase réclame deux ou trois années. Le troisième stade est la qualification. Il s'agit alors de définir les méthodes de fabrication, et de démontrer leur viabilité technique et économique en produisant de nombreuses machines, pour faire subir à plusieurs d'entre elles des essais d'endurance. Ces essais doivent garantir un fonctionnement correct pendant quinze ans dans les conditions d'exploitation des usines. La phase finale est celle de la production. Les cadences de fabrication sont augmentées jusqu'aux niveaux réels de production, et une cascade pilote est installée. Elle deviendra à terme la première cascade de la série.
Grâce à une planification et à une exécution soigneuses des différentes étapes de ce programme, chaque génération de centrifugeuses Urenco a fait ses preuves au niveau technique et économique avant sa mise en service industrielle. Cette démarche était peut-être excessivement prudente, et Urenco a pu surestimer les limites de résistance des matériaux, et surdimensionner ses centrifugeuses. Toutes ont fonctionné beaucoup plus longtemps que leur durée de vie théorique, avec de faibles taux de pannes. Initialement, celui-ci était estimé, par an, à 1 % du parc de machines.
La durée de vie des modules des usines était estimée à une dizaine d'années en moyenne. Après plus de vingt ans d'exploitation, les premières machines sont toujours en service, et les dernières générations présentent des taux de pannes moins importants ! Un record sans précédent si l'on considère les très hautes vitesses utilisées et le fait que les machines sont exploitées en continu et sans maintenance. La situation est comparable à celle d'un moteur de voiture qui tournerait à son régime maximum pendant 56 millions de kilomètres entre chaque visite d'entretien !
Urenco a augmenté sa capacité par étapes, au fur et à mesure de l'augmentation de sa part de marché. Dès qu'une nouvelle génération de machines était mûre pour la production, elle était rapidement installée dans l'unité suivante de l'usine. Situation inhabituelle, cinq générations sont aujourd'hui en service. Les travaux de mise au point d'une sixième génération de machines sont aujourd'hui achevés, et une unité utilisant cette technologie devrait entrer en service fin 1999 dans l'usine allemande.
L'organisation d'Urenco a été imaginée alors qu'une forte augmentation de la de-



L'utilisation de matériaux composites est au cœur des gains de rendement.

mande (et des prix) était prévue. Grâce au succès de son concept de développement, les modèles actuels offrent un rendement près de cinquante fois supérieur à celui des premières machines. Urenco est très compétitif sur un marché qui, en réalité, se développe lentement sur un fond de chute des prix. Bien que le potentiel de développement soit aujourd'hui limité, essentiellement en raison de l'absence de matériaux adéquats, on peut attendre de nouvelles améliorations d'ordre économique, notamment grâce aux progrès de fabrication, et à l'accroissement des performances des usines. ■

LES ENJEUX DU PROLONGEMENT DE LA VIE D'UNE CENTRALE

Les compagnies qui utilisent une énergie d'origine nucléaire pour produire de l'électricité sont toutes confrontées au problème du maintien et du renouvellement des licences d'exploitation de leurs installations. Cette difficulté se pose dans deux cas : lors de l'expiration des licences, et lorsque la durée de vie estimée des installations est atteinte. Ces compagnies ont donc été amenées à développer des programmes importants afin de garantir la conformité de l'exploitation de leurs installations avec les termes décrits dans les licences. Elles ont dû effectuer un travail de modification et de mise à niveau des équipements, en prenant en compte les plus récents progrès technologiques, les modifications intervenues dans le cadre réglementaire, et le retour d'expérience acquis par l'ensemble des installations similaires en service dans le monde.

Ces travaux ont permis d'acquérir des connaissances approfondies de tous les aspects du vieillissement des centrales. Les programmes d'études, menés sur des sites en exploitation comme sur des installations définitivement arrêtées, ont permis par exemple de définir avec précision l'évolution, après plusieurs décennies d'exploitation, des matériaux constituant les enveloppes de confinement et les barrières de sécurité.

La comparaison de ces résultats avec les données contenues dans le dossier de sûreté initial — qui a permis l'obtention de la licence d'exploitation — donne le moyen aux compagnies électriques de démontrer aux autorités de tutelle que des travaux permanents de remise à niveau, ainsi que le maintien de l'ensemble des facteurs de sécurité requis par les dossiers de sûreté permettent de demander un prolongement de la durée d'exploitation, à condition que celle-ci soit économiquement justifiée.

La Grande-Bretagne possède un parc dit de première génération (filière graphite/gaz) qui atteint aujourd'hui une durée d'exploitation de trente-cinq ans. Les Etats-Unis possèdent un parc dit de deuxième génération (filière eau légère) qui atteint aujourd'hui une durée similaire d'exploitation de trente-cinq ans. Les deux articles qui suivent permettent de comparer la manière dont ces deux pays, pionniers dans l'utilisation de l'énergie nucléaire à l'usage civil, ont mené ces démarches auprès de leurs autorités de tutelle respectives.

Dominique Pujet, BNFLSA

Maîtriser le vieillissement des centrales Magnox

Les progrès de la recherche permettent de mieux estimer l'usure des composants des centrales Magnox. Grâce à ces études il est possible de prolonger la durée de vie des usines, et d'en accroître la rentabilité.

T.Y. STOKOE

BNFL exploite actuellement huit centrales nucléaires Magnox, qui sont à l'origine d'environ 6 % de l'électricité produite au Royaume-Uni. Conçues dans les années 1950 et 1960, leur âge moyen est de trente-cinq ans.

La plupart des réacteurs Magnox sont constitués de grosses cuves sphériques sous pression, de 20 mètres de diamètre en moyenne. Celles-ci sont constituées de tôles d'acier forgé de 75 à 100 mm d'épaisseur, soudées les unes aux autres. Les sites de Wylfa et Oldbury se distinguent par leur technologie de construction en béton précontraint. Le cœur de l'ensemble des réacteurs est composé de blocs de graphite emboîtés. Il supporte un faisceau de crayons de combustible en uranium métallique naturel, gainé d'alliage de magnésium. La chaleur générée par les réactions nucléaires est récupérée par du dioxyde de carbone gazeux, maintenu à des pressions comprises entre 10 et 27 bars (entre 1 et 2,7 MPa). Le gaz, en circulation forcée, pénètre dans le réacteur à une température d'environ 190 °C, et en ressort à 360 °C pour se diriger vers les échangeurs thermiques.

Entre 1989 et 1993, la production a été interrompue dans trois centrales Magnox pour des raisons économiques. Ces centrales sont actuellement en cours de démantèlement. En 2002, une quatrième sera arrêtée. Afin de maintenir l'exploitation des autres centrales, la preuve de leur sûreté et de leur rentabilité doit être apportée en permanence. Des technologies avancées jouent un rôle clé dans ce domaine. Voyons-en quelques exemples.



Dans le hall du réacteur (ici, celui de Oldbury) se trouve la rampe de la machine de chargement de combustible.

La maintenance de la centrale et la surveillance des principaux matériaux et composants structuraux sont indispensables à la poursuite de l'exploitation. La durée de vie d'une centrale, à condition qu'elle reste rentable sur un marché britannique de l'électricité devenu très concurrentiel, est déterminée par les effets et le contrôle du vieillissement.

Les centrales Magnox, qui furent les premières centrales nucléaires commerciales construites dans le monde, ont été également les premières pour lesquelles il a fallu se pencher sur la question de la modernisation des normes de sûreté. A la fin des années 1970, une série d'enquêtes (ou bilans de sûreté à long terme) ont été menées dans les usines les plus anciennes, afin de définir un « dossier de sûreté » destiné à étendre leur durée d'exploitation de vingt ans jusqu'à environ trente ans.

L'expérience acquise avec ces bilans a permis de mettre en place un système d'évaluation complète de la sûreté nucléaire des usines. Ces évaluations, baptisées « bilans de sûreté périodiques », sont

T.Y. STOKOE
BNFL,
centre de Berkeley,
Gloucestershire.

réalisées tous les dix ans. Elles comportent un examen des effets du vieillissement à long terme, ainsi que des comparaisons avec les normes de sûreté nucléaire modernes. Elles étudient également les avantages que peut apporter la mise en œuvre de nouvelles technologies.

Des bilans pour étendre la durée de vie des centrales

D'importantes modifications sont effectuées sur les centrales afin de renforcer les principaux systèmes de sûreté et d'améliorer leur fiabilité (tableau ci-dessous). On peut citer par exemple :
– le renforcement et l'harmonisation des systèmes d'arrêt du réacteur afin d'en accroître la fiabilité ;
– l'installation d'un troisième système de refroidissement d'urgence du réacteur ;
– l'installation de postes de contrôle distants, dotés d'équipements électroniques modernes, qui, en cas de perte du poste de contrôle principal, affichent et enregistrent les données destinées à aider le personnel dans la prise de mesures correctives d'urgence ;
– la réalisation d'importantes modifications visant à améliorer les protections contre les incendies, les ruptures du circuit pressuriséet les séismes ;
– l'amélioration des structures, des mécanismes, des commandes et de l'instrumentation associés à la manutention du combustible.

La plupart des centrales ont bénéficié de bilans complémentaires, réalisés dans le but de poursuivre leur exploitation au-delà de trente ans, voire, dans le cas des deux plus anciennes, au-delà de quarante ans. Les dossiers de sûreté ont été validés par un organisme réglementaire britannique indépendant, le NII (Nuclear Installations Inspectorate).



L'inspection et la maintenance du cœur d'un réacteur Magnox sont effectuées à l'aide de ce robot.

Depuis la construction des centrales Magnox, un grand nombre d'installations et d'équipements ont été remplacés, ou ont subi des améliorations majeures, pour remédier à leur obsolescence ou à un vieillissement important. Certaines structures fixes se révèlent néanmoins difficiles ou extrêmement coûteuses à remplacer. Le vieillissement de ces composants détermine la durée de vie des centrales.

Les principales structures fixes sujettes à un vieillissement important sont les cuves sous pression en acier des réacteurs (CPR), les structures internes en acier des réacteurs et les cœurs en graphite.

Les cuves en acier vieillissent selon un processus de fragilisation, causé par l'irradiation neutronique. Celui-ci conduit à une augmentation progressive de la température de transition d'un comportement fragile des matériaux vers un comportement ductile. Or, le dossier de sûreté exige que les matériaux soient ductiles lors du fonctionnement normal. De plus, les matériaux de soudure employés dans certaines centrales peuvent subir une fragilisation par irradiation, si bien que la marge entre la température d'exploitation et la température de transition devient relativement faible en certains points des cuves. Pour résoudre ce problème, les températures d'exploitation des cuves ont été augmentées ces dernières années.

A la fin des années 1960, des observations ont montré que les composants qui maintiennent les structures en acier soumises à des températures élevées au sein des réacteurs se dégradent par un processus d'oxydation. La décision a été prise d'abaisser la puissance utile de l'ensemble des centrales (hormis dans le cas des réacteurs à plus faible température de Calder Hall et de Chapelcross). Pour ce faire, la température maximale des gaz du réacteur a été abaissée d'environ 50 °C.

Une vitesse d'oxydation faible, des réparations possibles

En outre, un programme visant à étudier l'effet de l'oxydation sur les fixations boulonnées et soudées à l'intérieur du réacteur a été lancé en parallèle avec un programme de contrôle des réacteurs. On a ainsi démontré que la vitesse d'oxydation est actuellement faible, et qu'il est possible d'effectuer des réparations là où des problèmes se sont posés. En raison de l'inaccessibilité de certains équipements, il a fallu déployer une technologie moderne de contrôle et de réparation à distance. Une installation pilote, contenant des équipements grandeur nature, a été construite afin de réaliser des essais en conditions réelles, préalablement à la mise en œuvre des travaux de réhabilitation.

Les propriétés mécaniques et chimiques des cœurs en graphite sont affectées par un phénomène appelé oxydation radiolytique. Il s'agit d'une dégradation d'une partie du gaz carbonique réfrigérant (CO_2) en monoxyde de carbone (CO) et en radical oxygène (O), provoquée par son irradiation. Ces produits indésirables ont une courte durée de vie, mais ils sont chimiquement actifs : ils réagissent avec le carbone pur des blocs de graphite, qui se transforme alors en CO gazeux. Il est donc impératif de surveiller périodiquement certains para-

Améliorations apportées à l'issue des bilans de sûreté

AMÉLIORATION DE LA CENTRALE	INTÉRET EN MATIÈRE DE SÛRETÉ
Détection des fuites du circuit de gaz	Possibilité de prévenir les défaillances du circuit de pression
Evacuation des gaz chauds	Atténuation des conséquences d'une éventuelle rupture des conduites de gaz
Systèmes d'arrêt	Amélioration de la fiabilité et de la résistance aux défaillances en mode commun
Refroidissement après défaillance	Amélioration de la fiabilité et de la résistance aux défaillances en mode commun
Risques d'incendie	Baisse des risques d'incendie susceptibles de mettre hors service les installations de sûreté
Risques sismiques	Meilleure résistance aux séismes des structures et des équipements
Equipements de levage	Amélioration de l'intégrité et de la fiabilité
Centre d'indication de secours	Amélioration de la disponibilité des données de l'installation en cas de perte du poste de contrôle principal



Le réacteur Magnox de Oldbury comporte deux unités de 250 MW mises en service respectivement en 1967 et en 1968

mètres, et de réaliser des essais sur des échantillons de graphite prélevé au niveau du cœur.

Mais le processus principal de vieillissement observé dans les centrales, et notamment dans celles de grande puissance qui fonctionnent à des pressions élevées, est la perte de densité apparente du graphite. En effet, le rapport carbone/uranium a une influence déterminante sur le maintien du rendement de la réaction nucléaire, et donc sur la fréquence de remplacement du combustible. Pour contrer les effets indésirables de la « perte de poids » graduelle du graphite, des travaux permettent actuellement d'étudier les effets de l'introduction d'un combustible légèrement enrichi en isotope 235 de l'uranium.

La mécanique des fractures appliquée aux cuves

A l'heure actuelle, on considère qu'aucun autre mécanisme de vieillissement du graphite ne limite la durée de vie des réacteurs.

Voyons maintenant quelques exemples spécifiques d'étude de vieillissement. La compréhension des facteurs qui influent sur l'intégrité des matériaux constituant les cuves sous pression repose sur la mécanique des fractures. Cette science s'est beaucoup développée au cours de ces dernières années. De vastes programmes de recherche ont été entrepris afin de déterminer la résistance à la rupture des cuves, et en particulier la ténacité à la rupture des matériaux. Initialement, les seules données disponibles provenaient des plans de surveillance instaurés lors de la mise en service des centrales. Ceux-ci étaient fondés sur des essais mécaniques post-irradiation, effectués sur de petits échantillons de matériaux constitutifs des cuves. Afin de disposer de données supplémentaires, des échantillons, représentatifs des cuves en acier de l'ensemble des centrales, ont récemment été prélevés sur des matériaux de soudure dans une cuve du réacteur de Trawsfynydd après son arrêt définitif. L'objectif de cet échantillonnage est de démontrer que, pendant une exploitation normale, le matériau en question demeure parfaitement ductile. Les limites structurelles sont calculées à l'aide de la mécanique des fractures. Le prélèvement des échantillons a constitué un grand défi technologique : tous les travaux effectués se devaient d'être menés à distance. Aussi, un jet d'eau haute pression a été utilisé pour découper la tôle d'acier de 90 mm d'épaisseur.

Caractéristiques des centrales Magnox

CENTRALE	PUISSANCE (MW)	MISE EN SERVICE
Calderhall	240	1956
Chapelcross	240	1959
Bradwell	245	1962
Hinkley point A	470	1965
Dungeness A	470	1966
Sizewell A	420	1966
Oldbury	430	1968
Wylfa	950	1971

Les modèles informatiques pour le calcul des contraintes

Parmi les facteurs à prendre en compte pour l'étude des cuves, on peut noter : leur diamètre, l'épaisseur de la tôle, la pression du circuit de gaz, sans oublier la géométrie locale des matériaux au niveau des ouvertures de la cuve (par exemple, au niveau des conduites d'arrivée et de sortie du gaz). De plus, les cuves sont soumises à des gradients de température non négligeables entre le haut et le bas du cœur du réacteur. Des modèles informatiques de dynamique des fluides et de transfert thermique, validés à l'aide des données enregistrées par des thermocouples, permettent un calcul de contraintes précis. Le chauffage induit par le rayonnement de neutrons dans toute l'épaisseur des parois est aussi déterminé avec précision par ces analyses.

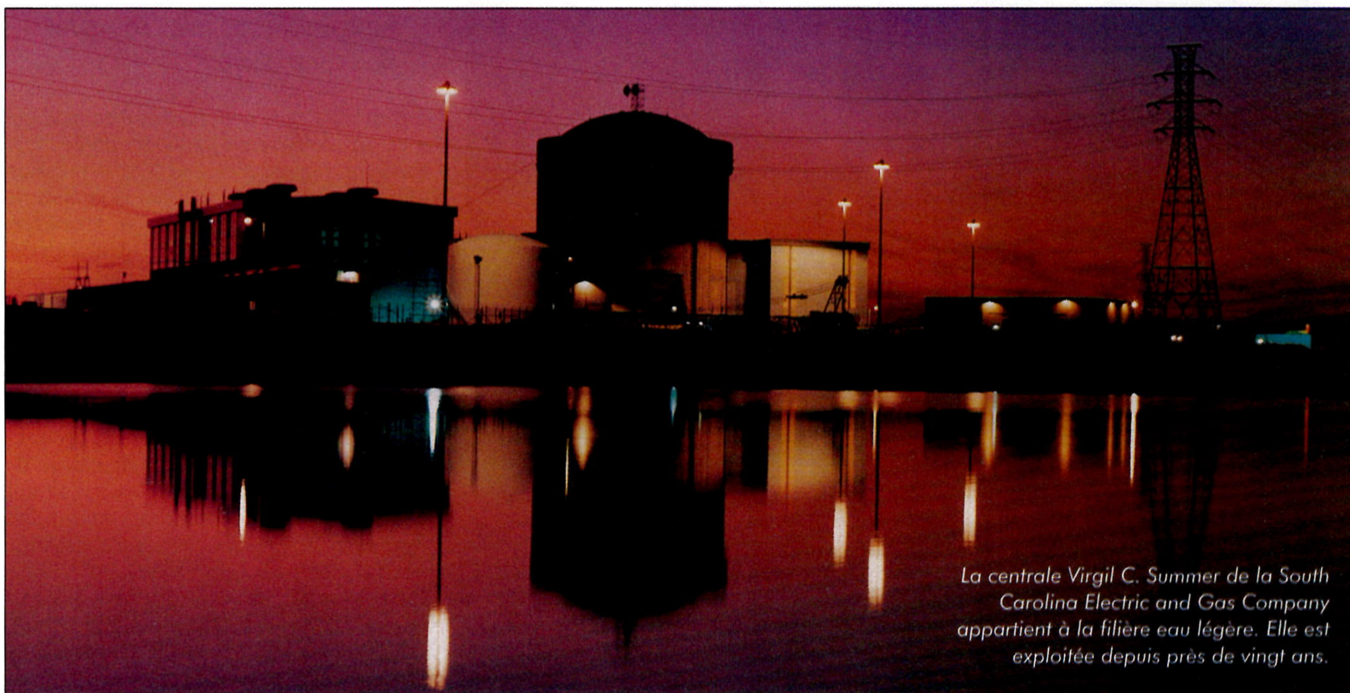
Autre exemple de vieillissement, les turbines à vapeur. Elles subissent une fissuration due à un type particulier de corrosion, dit « corrosion sous contrainte ». Ce mécanisme apparaît lorsque certains matériaux sont soumis, dans un environnement corrosif, à de fortes sollicitations mécaniques et à des températures élevées. Un programme de contrôle et de rénovation, qui fait appel à des méthodes modernes de contrôle par ultrasons, a été mis en place dans les centrales Magnox. Il repose sur une méthodologie d'évaluation qui permet de déterminer la probabilité de panne des turbines. Cette méthodologie a été établie sur la base d'une modélisation théorique, d'essais des matériaux, et des données de contrôle. Elle permet d'optimiser le déploiement des ressources de maintenance des turbines.

Ces quelques exemples nous permettent de comprendre comment des procédures d'évaluations du vieillissement sont menées avec rigueur. Les domaines scientifiques auxquels ces expertises font appel connaissent des progrès substantiels qui permettent une évolution permanente des bilans de sûreté. La durée de vie des centrales Magnox peut ainsi être estimée de façon toujours plus rigoureuse. La rentabilité de ces installations en est accrue, sans toutefois nuire aux considérations de sûreté. ■

Un programme complet pour des centrales plus sûres

La procédure pour obtenir une prolongation de licence est longue et coûteuse. Les exploitants des centrales Westinghouse se sont regroupés pour mener ensemble les études préalables et partager leurs coûts.

ROGER A. NEWTON, ROBERT J. MCDEVITT, CHARLES E. MEYER, THEODORE A. MEYER



La centrale Virgil C. Summer de la South Carolina Electric and Gas Company appartient à la filière eau légère. Elle est exploitée depuis près de vingt ans.

Westinghouse Owners Group (WOG) est une organisation d'exploitants de centrales nucléaires équipées d'un système d'alimentation en vapeur fourni par Westinghouse Electric Corporation. Elle se compose de 24 compagnies d'électricité américaines et de 8 compagnies internationales. Le WOG aborde les problèmes de réglementation, d'exploitation et de maintenance des centrales nucléaires, sur une base générique bénéficiant des similitudes de conception entre toutes les installations du groupe. L'approche générique est particulièrement rentable, puisque les dépenses sont partagées entre tous les exploitants, y compris Westinghouse.

WOG a récemment pris des initiatives majeures quant à la gestion du cycle de vie (Life Cycle Management – LCM) et au renouvellement de licence (License Renewal – LR). La gestion du cycle de vie a été axée sur la mise en œuvre de stratégies de maintenance rentables, permettant d'aborder le défi du vieillissement des équipements et des structures. L'effort relatif au renouvellement de licence est centré sur l'évaluation générique des effets du vieillissement, et la préparation de rapports techniques servant de référence à l'autorité de sûreté américaine (Nuclear Regulatory Commission – NRC).

La détérioration des équipements due au vieillissement se rencontre dans toutes les installations industrielles. Bien qu'il ne soit ni inhabituel ni imprévu, cet effet a fait l'objet d'une attention nouvelle ces dernières années, plusieurs centrales nucléaires américaines fonctionnant depuis vingt ans, soit la moitié des quarante années spécifiées par leur licence d'exploitation.

Des initiatives pour identifier et documenter les différents types de vieillissement

Cette base de quarante ans est définie par l'*Atomic Energy Act* (loi sur l'énergie atomique de 1954) et constitue la période typique, selon les exploitants, nécessaire à la rentabilisation des investissements. La conception des centrales prévoit des marges substantielles visant à prévenir toute défaillance. La traduction de cette marge en durée de vie n'a cependant pas été menée lors de la conception.

Avec les pratiques courantes de maintenance, les techniques de diagnostic et la qualité accrue des pièces de rechange, le critère des quarante ans n'est plus un jalon significatif pour la durée de vie des installations. De nombreuses unités de production alimentées par des combustibles fossiles ont depuis longtemps dépassé ce repère, et continuent de fonctionner de façon sûre et rentable.

Plusieurs initiatives sont en cours pour identifier et documenter les différents types de vieillissement attendus dans les centrales nucléaires, et recommander des actions d'atténuation appropriées. L'institut de recherche sur l'énergie électrique (Electric Power Research Institute – EPRI) a nommé, en 1985, un comité consultatif en matière de prolongement de la vie des installations (Plant Life Extension Advisory Committee) ; en 1991, le comité de gestion du cycle de vie a été formé pour poursuivre cet effort. La NRC dispose de son propre programme de recherche sur le vieillissement des centrales nucléaires depuis 1985. Ces deux programmes ont produit un volume significatif d'informations. Le conseil en ressources et gestion (aujourd'hui

ROGER A. NEWTON
Wisconsin Electric Power Corp., Milwaukee.
ROBERT J. MCDEVITT
Pacific Gas and Electric Company, San Francisco.
CHARLES E. MEYER, THEODORE A. MEYER
Westinghouse Electric Company, Nuclear Services Division, Pittsburgh.

institut de l'énergie nucléaire – Nuclear Energy Institute, NEI) a formé un groupe de travail dédié au prolongement de la vie des centrales nucléaires à la fin des années 1980. Celui-ci a élaboré une série de rapports techniques, consacrés aux composants majeurs des installations supposées continuer à fonctionner après renouvellement de licence. Le département américain à l'énergie (Department of Energy — DOE) a donné des lignes directrices quant à la gestion du vieillissement, afin d'estimer la façon dont les centrales devront fonctionner durant l'exploitation prolongée, et de fournir des recommandations dans le domaine de la maintenance. Sur la base de nombreuses évaluations, il est généralement admis que le vieillissement n'empêchera pas un fonctionnement continu des installations bien au-delà de la période courante des quarante ans.

Les calculs relatifs à la viabilité économique du prolongement de la vie des centrales opposent les coûts du remplacement des principaux équipements aux économies significatives découlant du report de la construction de nouveaux moyens de production. Ils montrent que le prolongement de la vie des installations permet l'économie de plusieurs centaines de millions de dollars par unité. Dans un marché déréglementé de l'électricité, où les compagnies électriques se concurrencent, le coût total de la production constitue un paramètre clé. La grande incertitude est le coût du renouvellement de la licence d'exploitation.

Au cours de l'année 1992, l'industrie nucléaire a réellement pris conscience de l'importance du renouvellement de licence pour la viabilité économique des installations. Les fermetures des centrales nucléaires de Yankee Rowe, San Onofre unité 1 et Trojan étaient toutes liées aux incertitudes du coût du fonctionnement prolongé. De plus, les efforts liés aux deux « installations chefs de file », destinés à préparer des demandes de renouvellement de licences, ont été interrompus. L'industrie s'est donc trouvée dépourvue d'initiatives pour démontrer la possibilité d'obtenir le renouvellement.

En décembre 1991, la Commission de réglementation nucléaire (Nuclear Regulatory Commission – NRC) a publié un règlement initial définissant le processus de renouvellement. Entre 1991 et 1992, plusieurs efforts visant à se conformer à la lettre au règlement ont démontré que le processus n'était pas rentable. Des actions ont donc été entreprises pour modifier le processus et les exigences de ce règlement. Sur l'initiative de la NRC, le 30 septembre 1993, un atelier a fourni des approches alternatives. Lors de cet atelier, l'institut de l'énergie nucléaire (NEI) a proposé, au nom de l'industrie nucléaire, des modifications du règlement. La NRC a alors proposé un règlement modifié qui accrédite implicitement les activités de surveillance requises par le règlement de maintenance, et limite les évaluations de renouvellement aux composants passifs à durée de vie longue. Des contributions supplémentaires ont permis de clarifier le but et les champs d'application du règlement proposé. La révision finale du règlement sur le renouvellement de licence est devenue effective le 7 juin 1995.

Un programme de gestion du renouvellement de licence afin d'aider les exploitants

C'est en 1993, dans ce contexte caractérisé par une gestion bien maîtrisée du processus de vieillissement, et un processus de renouvellement de licence non résolu, que le WOG a établi son programme de gestion du renouvellement de licence, devant être lancé conjointement à la gestion du vieillissement. Le budget du programme était à l'origine de 8,74 millions de dollars (environ autant d'euros), planifiant les activités sur cinq ans. Les objectifs du programme incluaient :

– les travaux, passés et en cours, pour la gestion du vieillissement et du programme des installations chefs de file (conformité au règlement de maintenance, réduction des coûts d'exploitation et de maintenance, identification et atténuation des risques et des incertitudes) ;

– la réduction du coût de renouvellement de licence pour les exploitants individuels (résolution des problèmes techniques sur une base générique, utilisation du financement de l'institut de recherche de l'énergie électrique et du DOE, collaboration avec le NEI pour l'intégration des aspects réglementaires) ;

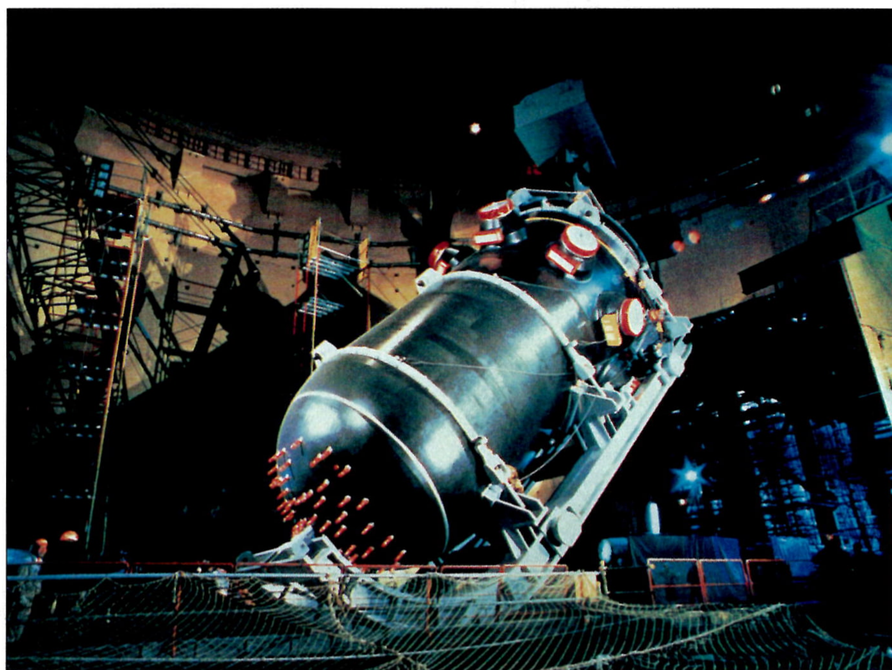
– l'adoption d'une approche concertée du renouvellement de licence.

La direction du programme a été décidée dans un groupe de travail composé de représentants de tous les membres du WOG. L'objectif était d'aider aussi bien les exploitants qui évaluaient ou menaient un renouvellement de licence, que ceux dont les installations étaient plus récentes.

Le programme incluait certaines obligations. La première consistait à établir des rapports techniques génériques. Les sujets techniques clés ont été préalablement identifiés par plusieurs études documentées. Ils sont généralement groupés dans les catégories *systèmes*, *structures* et *composants*. Les rapports avaient pour objectif de démontrer que les effets du vieillissement étaient gérés de façon appropriée. La méthode adoptée pour cette démonstration a évolué avec le temps et les exigences du règlement NRC. Initialement, ce dernier imposait de mener des évaluations détaillées sur les mécanismes de dégradation dus au vieillissement. Le règlement révisé a été recentré sur la gestion des effets de la dégradation des composants et des structures passifs à durée de vie longue.

De façon à consolider le rôle des rapports techniques au fil de leur évolution, un ensemble détaillé d'objectifs « génériques » a été développé. Des critères spécifiques ont été définis pour permettre un examen logique de chaque rapport technique par Westinghouse, les exploitants membres du WOG, ainsi que par d'autres experts.

Le développement de rapports techniques génériques satisfaisant au règlement révisé a impliqué une « évaluation du vieillissement fonctionnel » de composants individuels. Pour cela, les fonctions majeures des cen-



Lorsqu'elle est mise en place, après le transport, la cuve neuve du réacteur est basculée en position verticale.

trales incluses dans le champ d'application du règlement ont été identifiées. Dans chaque système, les fonctions des composants individuels ont été définies. Par exemple, une des fonctions principales du système de refroidissement d'un REP (réacteur à eau pressurisée) est de diriger le fluide réfrigérant. La tuyauterie, le corps de pompe, les tubes du générateur de vapeur et la cuve sous pression imposent la trajectoire du fluide. Chacun de ces composants doit fournir une enveloppe de pression intacte, de façon à garantir cette trajectoire. Par conséquent, la fonction d'enveloppe de pression des composants individuels du système de refroidissement du réacteur est la « fonction prévue » définie dans le règlement, qui doit être maintenue durant la période de renouvellement de licence.

Des rapports techniques établis d'après un modèle générique

Une fois les composants individuels et leur fonction prévue identifiés, un résumé des effets plausibles du vieillissement a été élaboré, sur la base de l'expérience du fonctionnement et d'études préalablement menées. L'étape finale du processus d'évaluation du vieillissement a consisté dans la définition d'activités spécifiques de maintenance, d'essais et d'inspection, visant à gérer les effets plausibles du vieillissement, et garantir de cette façon la fonction prévue de chaque composant. Cette démonstration a abouti à la conclusion que les activités identifiées étaient en mesure de garantir les fonctions globales du système.

Outre l'évaluation du vieillissement pour un système particulier, chaque rapport technique générique a permis d'établir les calculs de conception, définis en tant qu'« analyses du vieillissement à durée limitée » dans le règlement. Un aspect clé a été l'inclusion de la période d'obtention de licence dans le calcul.

Le processus de préparation des rapports a également changé sur la durée du programme, afin de continuer à satisfaire aux évolutions du règlement. Un modèle de rapport technique générique a été développé pour garantir une rédaction structurée. Ce modèle intègre :

– l'introduction, qui énumère les installations couvertes par le rapport, et définit son champ d'application sur les systèmes et composants soumis à évaluation ;

– l'identification des « analyses du vieillissement à durée limitée » et des effets du vieillissement, avec la description des systèmes et des composants, identifiant les « fonctions prévues », et les pièces ou les sous-composants sujets à un examen ;

– une appréciation des problèmes, accompagnée d'un examen des mécanismes de dégradation liés à l'âge, et de méthodes de gestion des effets significatifs du vieillissement ;

– les activités de gestion du vieillissement, et un tableau des caractéristiques du programme de gestion permettant aux exploitants de développer des programmes spécifiques à leurs installations ;

– le résumé et les conclusions qui doivent montrer que, dans le cas où les programmes de gestion du vieillissement sont mis en œuvre, les fonctions prévues seront maintenues durant la période d'exploitation prolongée conformément à la base de la licence en cours.

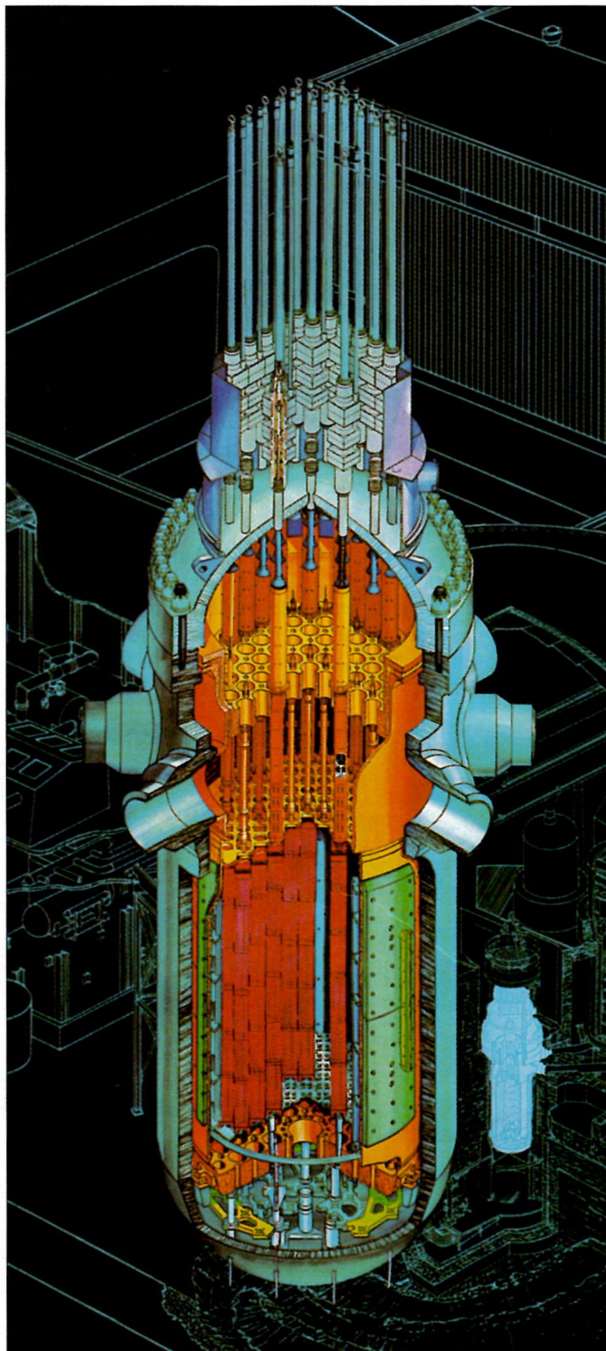
Une sélection de cinq rapports a été soumise à la NRC pour révision et approbation. Ces rapports se situent actuellement à différentes étapes de révision par la NRC. Avant leur achèvement, la plupart ont été révisés afin de s'assurer de leur exactitude par un groupe d'experts composé de membres du personnel des exploitants et de Westinghouse, et d'experts externes le cas échéant. Tous les rapports, y compris ceux soumis à la NRC, ont été distribués aux membres du WOG.

Au total, ce sont quelque quinze rapports qui ont été rédigés sur une période de plusieurs années. Chacun d'entre eux a été élaboré par un groupe composé de représentants des exploitants et de Westinghouse, et dirigé par un président assumant la responsabilité de la gestion du développement, du calendrier et du coût des rapports. Les cinq premiers rapports ont commencé à être élaborés en juillet 1993. Ils concernaient les vannes (motorisées ou non), les échangeurs de chaleur, les supports de cuve de réacteur et du système de refroidissement, et le système d'évacuation de la chaleur résiduelle.

Des rapports justifiant les demandes de renouvellement

Par la suite, le critère d'achèvement de tous ces rapports a été réévalué à la lumière des révisions planifiées du règlement, et les deux parties relatives aux vannes ont été supprimées. Les autres points ont été achevés durant le premier trimestre de l'année 1995. La réalisation de cinq rapports supplémentaires a démarré en mars 1994. Ils ont été achevés durant le deuxième trimestre de l'année 1995. Ceux-ci concernaient les cuves sous pression de réacteur, les parties internes des cuves, les pressuriseurs, les tuyauteries de classe 1, et le confinement du REP.

La troisième série de rapports a été lancée en mars 1995 et s'est terminée à la fin de cette même année. Elle avait pour but l'examen des structures de classe 1, les générateurs de vapeur, les corps de vannes, corps de pompe et carters de compresseur, les tuyauteries et les supports, et les réseaux de gaines hors classe 1. Enfin, la dernière série de rapports a démarré en septembre



Vue en coupe d'un réacteur nucléaire Westinghouse.

1996, pour étudier les équipements de distribution électrique, de commande et de surveillance, les câbles, les cuves sous pression, et les supports de tuyauterie de classe de sûreté 1. Ils ont été achevés durant l'année 1997.
Les rapports techniques génériques ont fourni la justification technique requise pour toute demande de renouvellement de licence d'exploitation prolongée. En outre, ils ont fourni des indications utiles à l'établissement de programmes d'évaluation pour les installations des membres du WOG.
La seconde obligation du programme global de WOG concernait la gestion du cycle de vie. Elle était destinée à mener à un équilibre entre les activités de maintenance correctives et préventives, et de s'assurer que toute dégradation des équipements était identifiée et corrigée, la vie des équipements optimisée, et le programme de maintenance des installations rentable. Les activités de surveillance, d'inspection et d'essais ont garanti que les équipements des centrales assureraient un fonctionnement sûr et fiable dans les limites requises. Des techniques prédictives de contrôle de maintenance et de diagnostic furent utilisées pour planifier la maintenance. Il a été également tenu compte des méthodes alternatives envisageables : analyses ponctuelles ou modifications d'installations.

Des indications pour identifier, détecter et atténuer les effets du vieillissement

Un comité *ad hoc* a été formé en novembre 1993 pour définir ce que le programme « gestion du cycle de vie » pouvait raisonnablement faire et assister les membres dans leur politique de gestion du vieillissement et de réduction globale des coûts. Il a développé initialement un modèle à quatre niveaux fonctionnels décrivant la façon dont la « gestion du cycle de vie » doit s'établir dans une entreprise exploitante. Chacun de ces niveaux (composant, système, installation et entreprise exploitante) mettait en œuvre la « gestion du cycle de vie » à sa façon en utilisant un processus logique. Ils ont été évalués selon les interrogations suivantes :
– qui est touché et a besoin d'informations ?
– quels sont les objectifs « gestion du cycle de vie » à ce niveau ?
– quels types de buts peuvent être atteints et quel type de décision doit être prise pour cela ?
– quels types « d'outils » (tout ce qui est nécessaire pour prendre des décisions ou atteindre les objectifs définis) sont disponibles ou doivent être fournis ?
Le modèle a montré que les décisions à prendre étaient différentes à chaque niveau. Il a également mis en évidence la façon dont les niveaux sont liés les uns aux autres pour le partage des ressources et des données. Il s'est enfin révélé utile à la compréhension du mécanisme de mise en œuvre de la « gestion du cycle de vie » dans les entreprises exploitantes individuelles. Les idées tirées de son développement ont été incluses dans un document plus détaillé.
Initialement, ce concept faisait partie d'un guide de mise en œuvre plus large relatif à la « gestion du cycle de vie ». Plusieurs sujets ont été identifiés dans des annexes pour être développés : surveillance structurelle, matériels inaccessibles, vieillissement du câblage, intégrité des systèmes.
Les travaux portant sur ces thèmes ont été achevés en 1997. Pour chaque problème, des indications spécifiques ont été fournies pour identifier, détecter et atténuer de façon efficace les effets du vieillissement, de façon à prolonger la vie de la structure ou du composant. Par exemple, les informations concernant la surveillance structurelle incluent des examens sur la conception, la construction, les matériaux (y compris les revêtements), et les mécanismes de dégradation pour l'acier et le béton. Pour chaque thème, des ateliers ont été mis en place, et des vidéocassettes, des manuels d'ateliers et des guides de terrain ont été préparés, afin de prendre en charge le processus de mise en œuvre spécifique à chaque installation.



La centrale Jose Cabrera à Guadalajara, en Espagne, est une des centrales arrivées à trente ans d'exploitation pour lesquelles se pose le problème du renouvellement de licence.

Un site Internet dédié à la diffusion des programmes

Un certain nombre d'anciennes unités des membres du WOG sont en attente de décision quant à la poursuite de leur utilisation et de la soumission d'une demande de renouvellement de licence. Certains exploitants reportent cette décision, avec l'idée « de ne pas exclure » cette option. Qu'un exploitant ait décidé ou non de poursuivre activement l'option du renouvellement de licence, il doit prendre à court terme, comme la mise en œuvre d'une évaluation de la vie de l'installation. Ce programme a été établi en 1995 par un groupe d'exploitants afin d'examiner les considérations nécessaires dans la poursuite du renouvellement de licence. Dans son concept initial, le programme se composait de quatre phases : étude de faisabilité initiale, évaluations spécifiques à l'installation, préparation de la demande et soumission avec suivi de la demande.
Cette mission initiale devait identifier l'infrastructure, les évaluations et les ressources nécessaires à un exploitant pour entreprendre la préparation d'une demande de renouvellement de licence. Le programme identifiait les éléments sur lesquels des économies de coûts pouvaient être réalisées, en effectuant conjointement des évaluations techniques sur des unités similaires. Cette phase s'est achevée en 1995. Elle a permis d'indiquer la façon dont les évaluations techniques de la phase suivante pouvaient être accomplies de façon rentable. Cette seconde phase a démarré en 1996 dans le but d'effectuer les évaluations réelles.
Parallèlement, un programme a été mené afin d'évaluer la performance des cuves sous pression sur une période de fonctionnement prolongée.
Un site Internet a été créé pour diffuser la documentation du programme à tous les membres du WOG impliqués dans le programme « gestion du cycle de vie ». Des versions électroniques de tous les rapports techniques génériques du programme, des guides de mise en œuvre de la « gestion du cycle de vie », des positions techniques du secteur et des documents réglementaires ont été également mis à disposition.
Enfin d'autres sites ont été créés pour prendre en charge les programmes relatifs à la cuve du réacteur. Les informations présentes sur ces sites sont issues des exploitants individuels et diffusées pour faciliter les coopérations entre membres du programme. ■

Une nouvelle génération de réacteurs

Westinghouse a développé un nouveau concept de réacteur nucléaire. Il apporte des solutions en termes de sûreté. Des systèmes entièrement passifs ont été adoptés pour garantir une fiabilité parfaite.

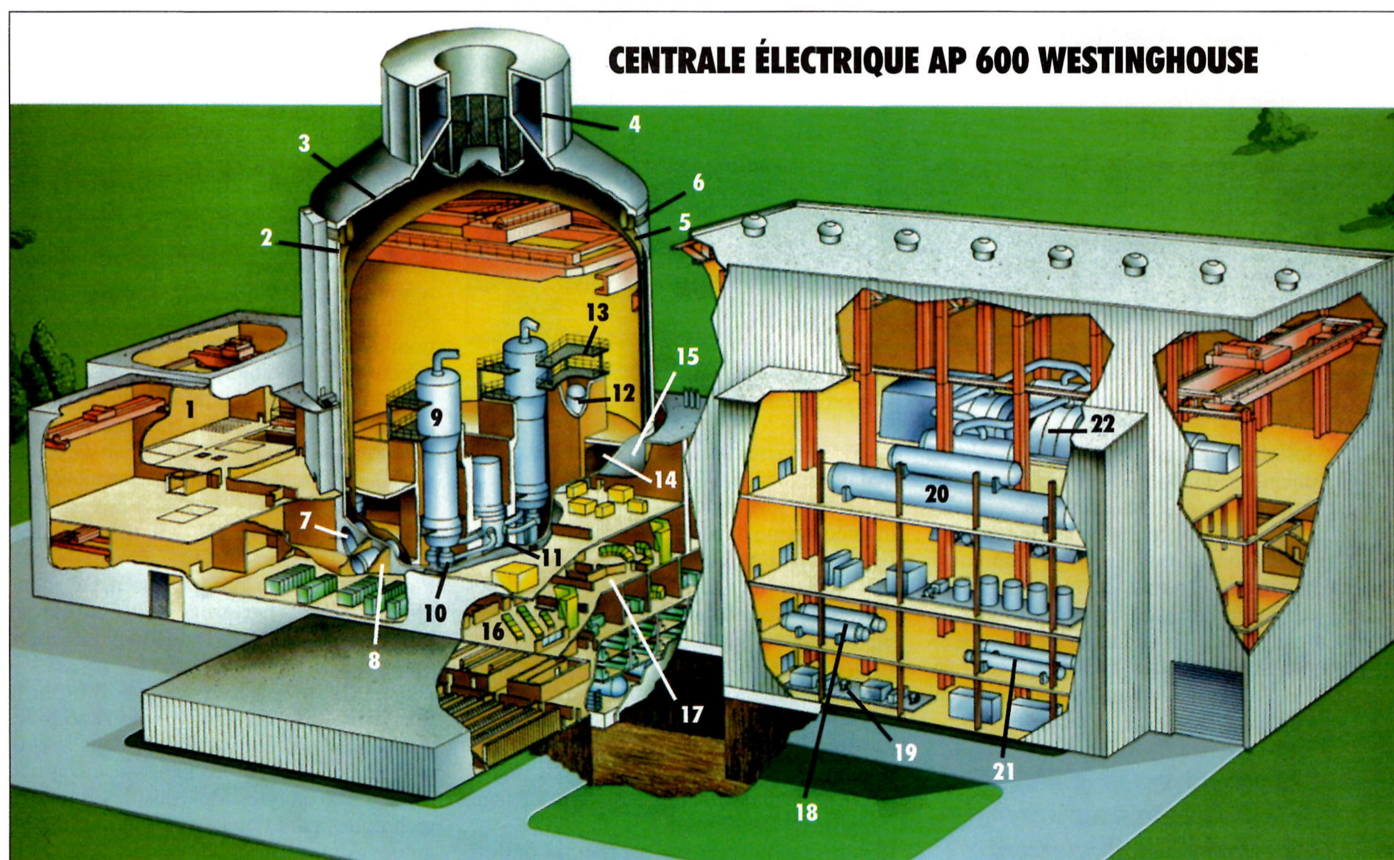
JEAN-FRANÇOIS SAGLIO

L'équipe AP 600 de Westinghouse a conçu un projet pour une nouvelle génération de réacteurs nucléaires : une unité de 600 MW, simple, sûre et économique. L'étude a été menée dans le cadre du programme ALWR (Advanced Light Water Reactor) sur les nouveaux réacteurs à eau légère, lancé par le ministère de l'Energie américain (US Department of Energy — DoE) et l'Institut de recherche sur l'énergie électrique (Electric Power Research Institute-EPRI).

Ce projet répond aux standards définis par le DoE, en combinant des systèmes de sécurité innovants, fondés sur l'emploi de forces naturelles sûres et de technologies éprouvées. La taille de l'AP 600 correspond à l'incrément de capacité optimal des réseaux électriques. Le dessin de l'AP 600 a été spécialement étudié pour simplifier le schéma d'ensemble des usines, ainsi que les principales opérations d'intervention, d'inspection, d'entretien, ou autres opérations réclamées par les exigences du contrôle qualité.

Cette simplification a été obtenue grâce à une réduction importante du nombre de composants complexes tels que les soupapes, les pompes, les tuyaux, les conduites de chauffage, les installations de ventilation et de climatisation... (voir fig. p. 21)

Au lieu de mécanismes électriques faisant appel à des systèmes motorisés, les dispositifs de sûreté retenus pour l'AP 600 sont



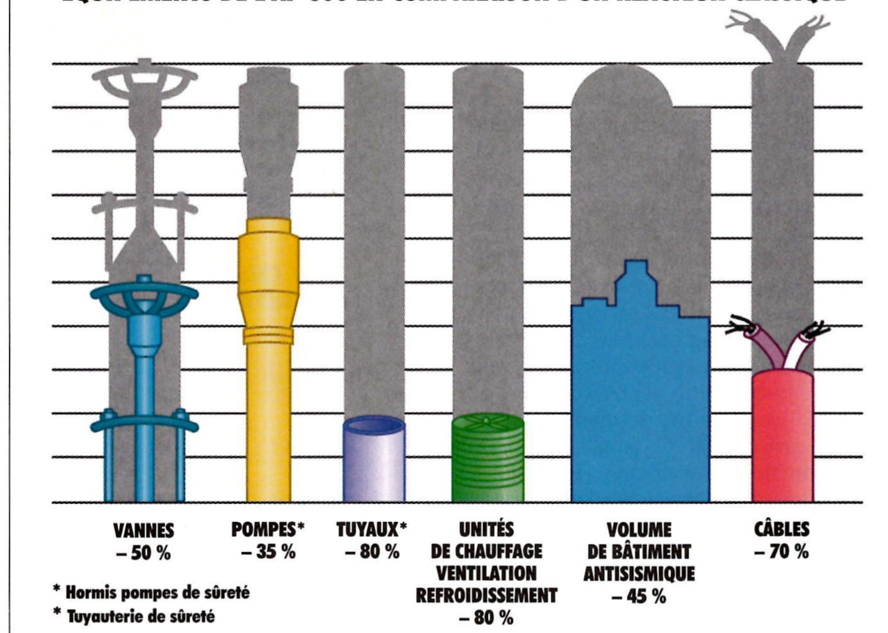
1 *Zone de manutention du combustible*
2 *Enceinte de confinement en béton*
3 *Enceinte de confinement en acier*
4 *Système de refroidissement passif : réservoir d'eau (PCCS)*
5 *PCCS chicanes de circulation d'air*
6 *PCCS entrée d'air frais*
7 *Sas d'accès pour le matériel*
8 *Sas d'accès pour le personnel*
9 *Générateurs de vapeur (2)*
10 *Pompes de refroidissement du réacteur(4)*
11 *Chaudière*
12 *Pressuriseur*
13 *Soupape de dépressurisation*
14 *Echangeur thermique passif pour la chaleur résiduelle*
15 *Réservoir d'eau pour le cœur*
16 *Locaux technique*
17 *Salle de commande*
18 *Echangeur pour alimentation en vapeur haute pression*
19 *Pompe à eau d'alimentation*
20 *Désaérateur*
21 *Echangeur pour alimentation en vapeur basse pression*
22 *Groupe turbine-alternateur*

JEAN-FRANÇOIS SAGLIO
BNFL SA.

principalement passifs : ils reposent uniquement sur l'action de forces naturelles. Une fois armés, ces équipements satisfont à toutes les exigences de sécurité. Leur caractère passif est un gage majeur de fiabilité, tandis leur simplicité accroît la sûreté de l'usine.
Pour parvenir à assurer un niveau élevé en termes de sûreté publique, les concepteurs de l'AP 600 ont tiré profit de quarante ans d'expérience dans les composants et la technologie des réacteurs à eau légère. Durant la mise au point de ce projet, un programme d'essais complet a été mené. Il a permis de vérifier l'intégralité des composants du réacteur, les éléments de sûreté, et le comportement des barrières radiologiques. A l'issue de ce programme, fin 1994, l'AP 600 était le projet de nouveau réacteur le plus minutieusement testé, jamais examiné par la commission de réglementation nucléaire des Etats-Unis (US Nuclear Regulatory Commission — NRC). Les résultats des essais de validation ont confirmé le comportement exceptionnel des systèmes passifs et ont facilité les démarches de validation.

Une installation au dessin très simplifié et à la sûreté accrue

Durant les quatorze années d'études qu'ont comptées ce projet, 1 300 hommes/année ont été employés, pour un coût total de 400 millions de dollars. Pas moins de 30 millions de dollars, et 110 hommes/année de travail, ont été affectés pour les seuls dossiers de validation réglementaire. La NRC a procédé à l'examen approfondi de l'AP 600, dont le projet a été approuvé en septembre 1998. L'avant-projet détaillé a été établi en 1998 sous l'égide du DoE et de l'EPRI.
Le premier objectif de l'AP 600 est d'offrir une installation au dessin très simplifié. Celui-ci respecte les obligations réglementaires et atteint, voire dépasse, les objectifs de sûreté de la NRC ainsi que ceux fixés dans le cadre du ALWR. Tout en étant compétitif sur l'ensemble du cycle en comparaison des autres systèmes de production d'électricité, l'AP 600 apporte des réponses aux problèmes de sûreté connus. En faisant appel à des composants éprouvés, ni prototype d'ensemble ni modèles de démonstration n'ont été nécessaires. La simplification des dispositifs, accompagnée de l'accroissement des marges opératoires, a permis de réduire les interventions des opérateurs en cas d'accident. Dans l'hypothèse d'un accident mineur, l'AP 600 ne requiert aucune action humaine pour maintenir une configuration sûre. Un des objectifs du projet a été, par ailleurs, de ne pas requérir de zone de protection au-delà des limites du site en cas d'urgence. Enfin, la simplicité de l'ensemble du concept de ce nouveau réacteur a considérablement facilité l'obtention de l'autorisation réglementaire nécessaire à son exploitation.
Le cœur de l'AP 600 est comparable à celui d'un réacteur de 900 MW à deux boucles et deux générateurs de vapeur, dont la densité volumique de puissance et la température sont plus faibles, et dont le cycle de combustible est porté à deux ans. L'eau contenue dans le circuit primaire est entraînée par un moteur hermétique. Les efforts ainsi que les effets thermiques et nucléaires sont atténués, ce qui conduit à un cœur plus sûr, et dont la durée de vie est accrue : celle-ci est estimée à soixante ans, au lieu de quarante ans pour les anciens réacteurs.
L'AP 600 sera construit par modules en usine, avec les techniques de la construction navale. Cette approche permet d'envisager, pour le processus de fabrication, des gains de temps et de coûts considérables. L'objectif est de limiter à trente-six mois la durée séparant le début du chantier et le premier chargement de combustible. En outre, cette approche permet d'effectuer une grande partie du contrôle qualité en usine avant d'acheminer les différents éléments sur le site.
On peut aujourd'hui estimer que le coût du kilowatt produit par deux AP 600 sera de 15 à 20 % inférieur à celui obtenu avec un réacteur traditionnel de 1 200 MW.
Comme nous l'avons déjà évoqué, pour accroître la sûreté globale de l'installation et répondre aux normes de la NRC en ce domaine, l'AP 600 n'emploie que des dispositifs de sûreté passifs. Ceux-ci font uniquement appel à des forces naturelles, tels la gravité, la circulation naturelle d'eau ou l'effet de gaz comprimé, tandis que les pompes, les ventilateurs, les moteurs, les réfrigérateurs ou autres systèmes équipées de pièces mobiles sont exclus.
Quelques soupapes sont employées pour la mise en sûreté des installations. Dans la plupart des cas, elles sont dites « sans risque de panne » : pour rester en position fermée (situation normale), elles nécessitent de l'énergie ; une perte d'énergie se traduit donc par leur ouverture et la mise en sûreté des installations. Ces systèmes passifs sont significativement plus simples que ceux employés pour les réacteurs à eau pressurisée (PWR).



La conceptionde l'AP 600 a permis une réduction substantielle de tous les composants complexes nécessaires à la réalisation du réacteur.

Des systèmes de sûreté simples et entièrement passifs

Signalons que, outre les bénéfices découlant de leur simplicité, les systèmes de sûreté passifs ne requièrent pas de dispositifs annexes, tels une alimentation électrique, une ventilation ou un conditionnement d'air, un refroidissement d'eau, ou une construction antisismique abritant l'ensemble. La conception des dispositifs de sûreté de l'AP 600 a, dans le même ordre d'idées, également écarté l'usage de générateurs Diesel, et donc de leurs équipements d'accompagnement pour le démarrage à froid, le stockage de carburant, les groupes de transfert, le système d'admission d'air et d'échappement. Ainsi l'ensemble des garanties de sécurité devant accompagner tous ces dispositifs n'ont plus lieu d'être.

Tous les systèmes de sûreté de l'AP 600 (injection passive, extraction passive de chaleur, refroidissement passif), respectent par conception le critère de défaillance unique de la NRC, ainsi que d'autres critères récents, spécifiques ou génériques, découlant entre autres des enseignements tirés de l'accident de Three Mile Island. Des analyses probabilistes de risque ont également été menées afin d'évaluer la sûreté globale du concept.

Une attention particulière pour le refroidissement du cœur

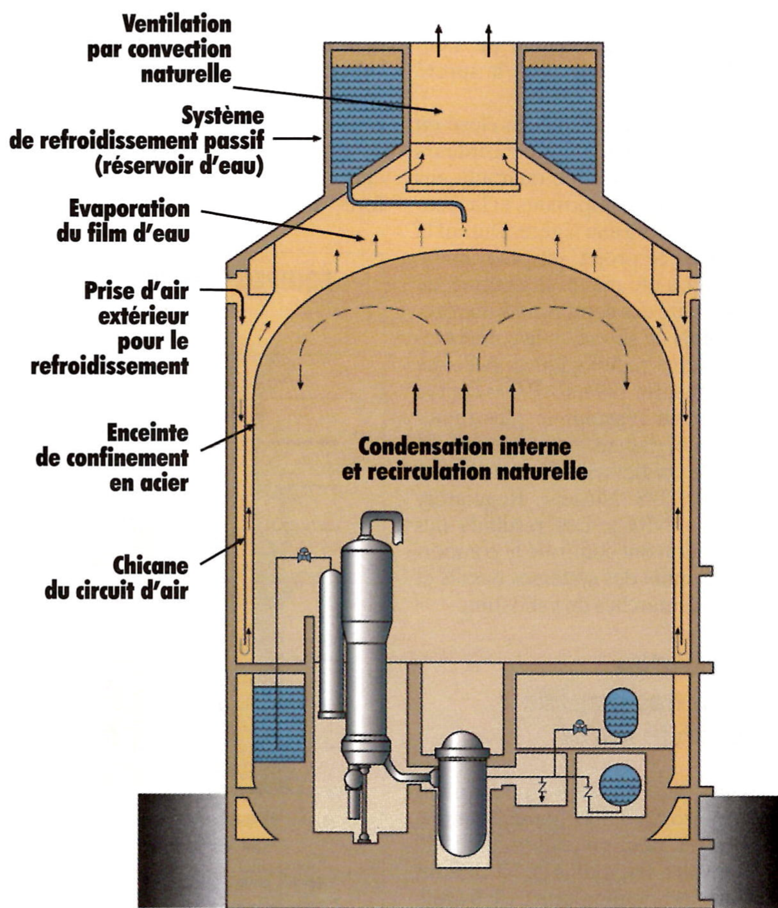
Le système de refroidissement passif du cœur (PXS) a reçu également une attention toute particulière lors de la conception de l'AP 600. Il remplit trois fonctions principales : extraction de la chaleur résiduelle, maintien du niveau du réfrigérant dans le réacteur et injection de sûreté. Les calculs montrent que ce système refroidit efficacement le cœur dans le cas de ruptures accidentelles diverses. Le cœur est ainsi totalement protégé pour des ruptures pouvant affecter des conduites d'arrivée d'eau de plus de 20 centimètres de diamètre. Une marge d'environ 300 °C, pour la température maximale de revêtement du combustible, est garantie dans le cas d'une double rupture de conduite d'arrivée d'eau au cœur. L'échangeur de refroidissement passif de chaleur résiduelle protège l'installation contre les transitoires, qui peuvent affecter l'alimentation du générateur de vapeur et les systèmes de production de vapeur. Les résultats des analyses effectuées avec les codes de calcul NRC montrent que ce dispositif satisfait les critères de sûreté pour une perte d'alimentation provoquée par la rupture d'un tuyau sur une ligne de vapeur.

Le dispositif de refroidissement passif d'urgence consiste en un ensemble de tubes connectés au dispositif de refroidissement du cœur (RCS). Ils forment une boucle de circulation naturelle, et sont isolés par une soupape maintenue fermée en temps normal. De même que précédemment, elle s'ouvre en cas de perte de puissance. Les tubes d'échange de chaleur sont disposés dans la réserve d'eau de refroidissement, au-dessus du RCS, ce qui assure la circulation naturelle d'eau chauffée depuis le RCS. Quand les pompes de refroidissement sont mises en action, le dispositif fonctionne en accéléré.

Le volume d'eau (plus de 20 millions de litres) de la réserve de refroidissement peut absorber, avant de se mettre à bouillir, l'équivalent de la chaleur libérée pendant deux heures de refroidissement du cœur. Ensuite, la vapeur générée dans l'enceinte de confinement se condense sur les parois en acier pour revenir à la réserve de refroidissement.

Le système de refroidissement passif du cœur utilise trois sources d'eau : les réservoirs du cœur (Core Makeup Tanks — CMT), les accumulateurs et la réserve de refroidissement d'urgence. Toutes sont connectées à des lances de refroidissement disposées sur le confinement du réacteur. Les CMT doivent servir à lutter contre des fuites limitées du RCS (transitoires ou liées à une indisponibilité du dispositif normal de maintien du niveau d'eau).

REFROIDISSEMENT PASSIF DE L'ENCEINTE DE CONFINEMENT (PCCS)



Le refroidissement de l'enceinte de confinement est entièrement passif : circulation d'air et libération d'eau permettent un parfait contrôle de la température et de la pression en cas d'accident.

Trois sources d'eau connectées à des lances de refroidissement

Deux CMT remplis d'eau borée peuvent remplir cette fonction, quelle que soit la pression du circuit de refroidissement du cœur, par simple effet de la gravité. Ils sont situés au-dessus de la boucle d'eau du RCS. En cas de niveau bas dans le pressuriseur, les pompes de refroidissement du cœur sont déclenchées, et les soupapes de décharge des CMT s'ouvrent automatiquement.

Les niveaux relatifs du CMT et des pressuriseurs sont tels que, si le niveau de refroidissement du cœur poursuit sa décrue, l'eau des CMT noie le cœur du réacteur.

De même que dans le cas des réacteurs à eau pressurisée (PWR) des accumulateurs haute pression sont nécessaires en cas d'accident conduisant à des fuites importantes, afin de compenser rapidement la perte d'eau de refroidissement dans le cœur. Les soupapes, ouvertes par la pression de gaz, isolent normalement les accumulateurs du circuit de refroidissement du cœur. Les accumulateurs peuvent répondre à la rupture du plus important tube de refroidissement du RCS, pour remplir rapidement le cœur jusqu'à son niveau minimal, et pouvoir ainsi poursuivre l'assistance aux CMT pour l'ennoyage du cœur.

La réserve de refroidissement d'urgence, qui alimente l'injection de longue durée, est située au-dessus des boucles du RCS. Elle est isolée en temps normal par des soupapes automatiques, maintenues à la pression atmosphérique, et ne peut donc être utilisée que quand le RCS est dépressurisé. Cela se fait automatiquement pour diminuer la pression jusqu'à environ 10 psi (0,7 atmosphère). A cette pression, l'eau de la

réserve peut entrer dans le RCS, malgré la pression résiduelle et la perte de charge. Le système de dépressurisation automatique du RCS est fait de quatre étages de soupapes garantissant une réduction de pression lente et contrôlée, notamment par le niveau des CMT.

Des modifications du réacteur dictées par l'analyse de risques

Examinons maintenant les systèmes de refroidissement passif du confinement, qui constituent l'ultime puits de chaleur (fig. ci-contre). Les calculs et les essais montrent que ce système est suffisant pour refroidir le confinement après un accident, et permettre la limitation et la baisse rapide de la pression. La « peau » d'acier du confinement joue le rôle de surface d'échange avec l'air extérieur, qui s'écoule le long de la paroi par circulation thermique naturelle pour être rejeté à l'extérieur. En cas d'accident, le refroidissement atmosphérique est assisté par l'évaporation de l'eau déversée sur l'extérieur du confinement d'acier. Cette eau s'écoule par gravité, d'un réservoir situé sur le toit du bâtiment, isolé par deux soupapes que la puissance du réacteur maintient fermées. Ce réservoir permet d'asperger trois jours durant le confinement.

L'analyse probabiliste des risques a été une partie intégrante de la conception de l'AP 600. Elle a été menée conjointement par ENEL (Ente Nazionale per l'Energia Elettrica) et Westinghouse. En ont résulté de nombreuses modifications de dessin du réacteur, par exemple celle du quatrième étage de soupapes de dépressurisation automatique du RCS, ou celle de la logique de démarrage de l'alimentation en eau et de l'ouverture de certaines soupapes. La fréquence de dommages accidentels au cœur de l'AP 600 est estimée à $1{,}7.10^{-7}$ par an. Chiffre à comparer avec l'objectif de la NRC de 1.10^{-4} par an, ou à celui de l'étude des nouveaux réacteurs à eau légère qui est de 1.10^{-5} par an. Rappelons que la fréquence estimée des centrales actuelles est de l'ordre de 5.10^{-5} par an.

Cette analyse probabiliste montre également que l'enceinte de confinement de l'AP 600 serait suffisante pour prévenir les fuites en cas d'accident grave, et que les risques d'exposition du public sont faibles. La fréquence de fuite est estimée à $1{,}8.10^{-8}$ par an, alors que l'objectif NRC est de 1.10^{-6} par an. Pour les centrales actuelles, le chiffre avancé est de 5.10^{-6} par an (tableau ci-dessous).

L'analyse probabiliste de sûreté montre enfin que l'ennoyage du bâtiment du cœur protégerait efficacement contre un risque d'accident du cœur en cas d'accident grave ; le cœur et son isolement sont conçus de telle manière que l'eau du bâtiment du réacteur peut refroidir ce dernier, et prévenir sa destruction. Maintenir l'intégrité du cœur élimine les risques de libération de produits radioactifs, et de destruction du confinement.

Toutes les fonctions et tous les flux de l'AP 600 ont été calculés par ordinateur. Les résultats obtenus par ces simulations se sont révélés conformes aux objectifs. Un important programme d'essais a également été conduit pour rechercher les valeurs des paramètres à introduire dans les codes de calcul. Ces essais se sont centrés sur les faibles pertes de refroidissement (Loss-Of-Coolant Accidents — LOCA), le système automatique de dépressurisation, la circulation naturelle autour de l'enceinte de confinement, le refroidissement accéléré par eau de l'enceinte de confinement, et le comportement thermohydraulique des CMT. En outre, des essais ont été menés sur les pompes du circuit de refroidissement, sur les soupapes et l'instrumentation, comme sur nombre de flux et de transferts de chaleur. Tous les aspects du système de sécurité passive ont été simulés, depuis les composants de sûreté élevée jusqu'au système de refroidissement de l'enceinte de confinement et du cœur. Tous les calculs et les codes ont été conservés et vérifiés par la NRC.

L'AP 600 a été testé et calculé minutieusement, ce qui en fait le réacteur le plus vérifié, avec le plus de soins et dans les moindres détails, par la NRC. En outre, un modèle en trois dimensions (3D) a été mis au point sur ordinateur avec sa base de données complète. Ce modèle a été largement utilisé pour mener des études de détails et d'accessibilité, en liaison avec les utilisateurs. Il permettra d'organiser et d'optimiser les différentes phases de la construction, et d'éviter les gênes pouvant résulter de modifications mineures, en permettant, au contraire, de les intégrer au fur et à mesure. Enfin, le modèle a permis de faire une estimation aussi soignée que possible du coût de construction de l'AP 600.

Le réacteur le plus vérifié par la NRC

Le rapport d'analyse de sûreté a été donné en juin 1992 par Westinghouse à la NRC, accompagné de l'analyse probabiliste de risques. S'est ensuite ouverte une période de dialogue : la NRC a formulé une série de questions auxquelles Westinghouse a pu apporter les réponses utiles.

En mai 1996, la NRC a produit un document sur le rapport de sûreté de l'AP 600. Il concernait en particulier les codes de calcul et les programmes d'essais. La réponse à toutes les questions a été fournie à la satisfaction de la NRC, jusqu'à l'approbation finale du dessin du réacteur en septembre 1998. Au-delà du marché américain, cela devrait faciliter la commercialisation mondiale de ce concept de réacteur. La phase finale du projet, qui comporte l'établissement de règles publiques valables pour la construction aux Etats-Unis, est en cours d'achèvement et conduira à la certification finale.

Ce projet de réacteur est aujourd'hui abouti, et l'AP 600 est prêt à être construit. La volonté de simplification, de standardisation, de modularité, d'emploi de solutions connues et de forces naturelles pour assurer la sécurité a conduit à un dessin simple, qui prend en compte les désirs des utilisateurs. C'est pourquoi l'électricité produite par ce réacteur sera notablement moins chère en comparaison de celle obtenue avec les réacteurs actuels les plus rentables, tout en offrant un niveau de performances, de confort d'exploitation et de sécurité largement accru. ■

Risques d'accident

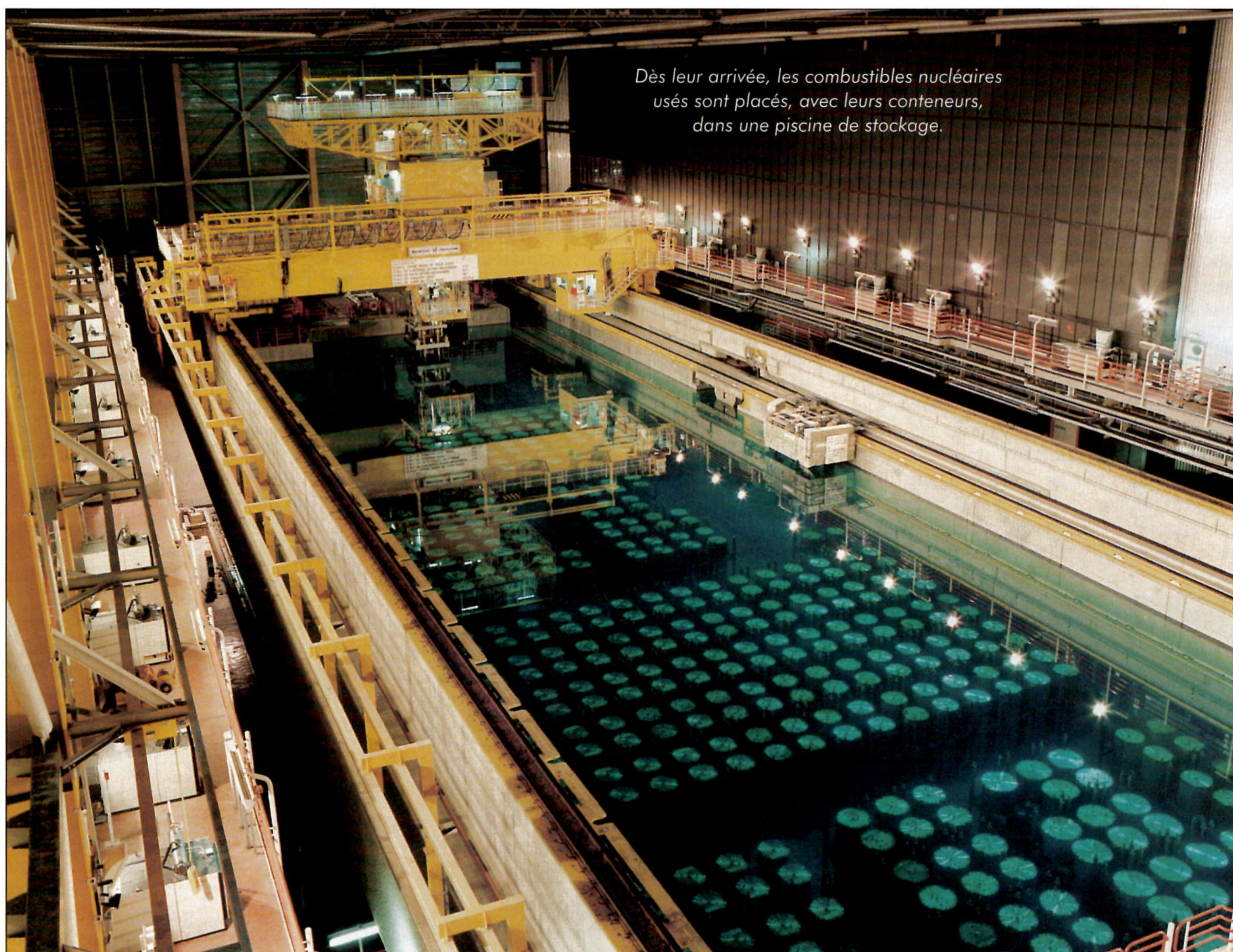
ÉVÉNEMENT	AP 600	CENTRALES ACTUELLES
Excursion	$5{,}0.10^{-9}$	$1{,}3.10^{-5}$
Boucle/Rupture	$1{,}0.10^{-9}$	$6{,}6.10^{-6}$
Rupture de tube GV	$6{,}1.10^{-9}$	$1{,}7.10^{-6}$
Perte de refroidissement :		
– LOCA petit	$1{,}0.10^{-8}$	$8{,}0.10^{-6}$
– LOCA moyen	$7{,}6.10^{-8}$	$5{,}0.10^{-6}$
– LOCA grave	$5{,}0.10^{-8}$	$8{,}0.10^{-7}$
Excursion anticipée sans déclenchement	$1{,}0.10^{-8}$	$2{,}2.10^{-6}$
Perte de refroidissement	$<1.10^{-9}$	$1{,}1.10^{-5}$
LOCA et perte de refroidissement	$<1.10^{-9}$	$1{,}0.10^{-6}$
Rupture du cœur	$1{,}0.10^{-8}$	$3{,}0.10^{-7}$
Risque global tous systèmes	$1{,}7.10^{-7}$	$5{,}0.10^{-5}$

Par rapport aux centrales actuelles, l'AP 600 affiche des probabilités d'accidents (ici, données annuelles) très inférieures.

L'usine Thorp, un projet de grande envergure

Thorp est le plus grand projet jamais mené par BNFL. Cette gigantesque unité de recyclage est l'une des plus grandes usines chimiques jamais réalisée. Elle traite aujourd'hui des combustibles usés provenant du monde entier.

CHRIS PHILLIPS


Dès leur arrivée, les combustibles nucléaires usés sont placés, avec leurs conteneurs, dans une piscine de stockage.

L'usine « Thorp » (pour Thermal Oxide Reprocessing Plant) fait partie des services de traitement des combustibles nucléaires usés proposés par la société BNFL. Son rôle est de séparer l'uranium et le plutonium contenus dans les déchets de fission issus des réacteurs britanniques de la filière « graphite-gaz », et des réacteurs à eau légère européens et japonais. Thorp a été construite sur un site nucléaire existant, Sellafield, doté d'une installation de recyclage du combustible Magnox, ainsi que des installations amont et aval associées. La planification de cette nouvelle usine a démarré au début des années 1970, lorsqu'il est devenu évident qu'un vaste marché pour le recyclage des combustibles oxydes allait se développer au Royaume-Uni, comme dans les autres pays. Les travaux de construction se sont terminés dans les délais, en 1992, et l'exploitation active de l'usine a commencé en mars 1994, avec les premières opérations de cisaillage et de dissolution des combustibles usés.
En janvier 1995, l'installation de séparation chimique a commencé à traiter les solutions de combustible usés dissous. Elle

CHRIS PHILLIPS
Thorp Group,
BNFL

DU COMBUSTIBLE

a obtenu sa licence d'exploitation complète en 1997. Depuis, quelque 2 000 tonnes de combustibles oxydes ont été recyclées. Le plutonium isolé sera transféré de Thorp vers l'installation de production du combustible nucléaire MOX, actuellement en cours de réalisation sur le site de Sellafield. De même que le plutonium, l'uranium peut être recyclé dans les réacteurs thermonucléaires. Pendant les dix premières années d'exploitation, Thorp sera en mesure de traiter 7 000 tonnes de combustible dont le taux de combustion pourra atteindre 40 GW-jour par tonne. Le combustible doit avoir été refroidi durant au moins cinq ans avant son traitement.

Des principes de conception nouveaux pour traiter des combustibles de haute activité

Dans l'avenir, il est prévu de retraiter des combustibles à plus fort taux de combustion. La construction de Thorp a coûté 1,8 milliard de livres sterling, (environ 2,75 milliards d'euros), prix évalué au milieu des années 1980. Avec quelque 15 000 cuves, 300 000 mètres de canalisations, 3 millions de mètres de câbles électriques et de câblages d'instruments, et 14 000 boucles d'instrumentation, regroupés dans un bâtiment de 500 m de long, 150 m de large et 50 m de haut, Thorp est l'une des usines chimiques les plus vastes et les plus complexes au monde.

Sellafield possède près de cinquante années d'expérience en matière de recyclage des combustibles métalliques d'uranium Magnox. Thorp peut traiter divers types d'oxydes d'uranium, de formes variées. Cette usine a été conçue pour le recyclage de combustibles dont l'activité est beaucoup plus forte que dans le cas du Magnox : les teneurs en plutonium et en produits de fission peuvent être respectivement en moyenne 5 fois et 11 fois supérieures. Des principes de conception nouveaux ont dû être développés pour parvenir à réaliser ce traitement tout en garantissant une sûreté optimale. Examinons-en quelques-uns dans le déroulement du processus.

Le combustible usés est livré à l'installation de traitement initial. Il y est stocké par immersion dans des piscines remplies d'eau, avant d'être cisaillé en tronçons de 50 mm de long, et dissous dans de l'acide nitrique. Les solides résiduels sont éliminés dans une opération de centrifugation. Les lames et les pinces des cisailles ont été conçues pour s'adapter aux différents types d'assemblages de combustibles utilisés de par le monde. Leur maintenance et leur remplacement s'effectuent à distance. Les pistons régulant l'alimentation en combustible sont situés en dehors du blindage antiradiations, afin de permettre au contraire une maintenance manuelle directe.

Le combustible et les matériaux de gainage tronçonnés tombent par gravité dans l'un des trois dissolveurs, utilisés en rotation afin de parfaitement contrôler le bain de dissolution avant le transfert vers l'installation chimique. Chaque lot de « coques » de gainage est contrôlé afin de détecter les éventuelles matières non dissoutes et de procéder à une nouvelle dissolution. Les solides résiduels sont éliminés à l'aide de deux centrifugeuses, dont les moteurs et les trains d'engrenages sont situés hors du blindage antiradiations pour faciliter la maintenance. La récupération des solides dans les bols des centrifugeuses s'effectue avec un jet d'eau. La suspension ainsi obtenue est directement transférée vers le poste d'enrobage de ciment. Ce système permet d'éviter la production d'un nouveau flux de déchets de filtration. Le principe d'une dissolution discontinue permet également d'ajuster la quantité d'acide utilisée pour chaque lot en fonction des proportions uranium/gaines de chaque type de combustible, et d'obtenir un produit homogène.

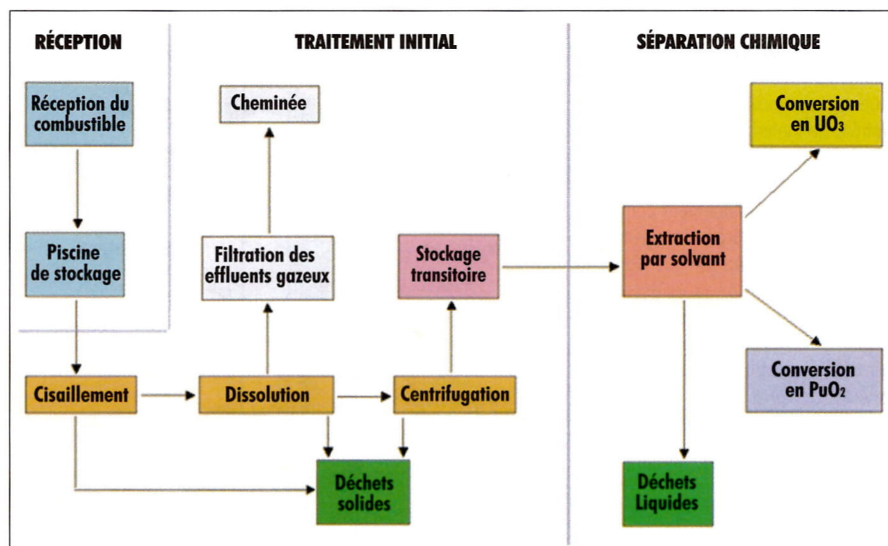
Le mouvement des fluides dans la zone radioactive blindée de l'usine s'effectue uniquement par gravité, afin d'éviter toute maintenance pendant la durée de vie de l'installation.

Cette première phase génère principalement des déchets solides de moyenne activité. Destinés à un stockage de longue durée, ils sont enrobés de ciment.

L'étape suivante est la séparation chimique. Un des objectifs poursuivis pour la conception de Thorp était de réduire au maximum le nombre, la taille et la complexité des équipements de traitement en contact avec les matières radioactives, afin de minimiser la dose d'irradiation reçue par les opérateurs, de réduire les coûts d'investissement et d'exploitation, et de limiter le nombre de flux de déchets.

Un schéma de principe visant à réduire les flux de déchets

A cet effet, un schéma de principe à « séparation précoce », prévoyant une séparation de l'uranium et du plutonium dès le premier cycle d'extraction par solvant, a été retenu. La conception, le développement et la validation de ce schéma ont été réalisés avec un soin extrême pour permettre l'utilisation de cycles uniques lors des étapes ultérieures de purification de l'uranium et du plutonium. Une attention particulière a été apportée à la chimie du neptunium(1) afin de l'orienter vers des flux de déchets appropriés. Pour séparer l'uranium et le plutonium, l'installation chimique fait appel au procédé d'extraction par solvant « Purex », qui utilise un solvant constitué de tributyl phosphate (TBP) et de kérosène. Le processus comprend trois



Après le stockage, le combustible usé est cisaillé et dissous, avant d'être envoyé dans l'unité de séparation chimique où il sera traité par un solvant d'extraction. Cette étape possède la particularité de ne compter que trois cycles.

cycles, au lieu de cinq dans les anciennes installations, d'où une réduction à la source du nombre de flux de déchets générés (voir fig. page 25). D'autres installations assurent d'une part la conversion du nitrate de plutonium en dioxyde de plutonium par précipitation à l'oxalate, et d'autre part la conversion du nitrate d'uranyl en trioxyde d'uranium par dénitration thermique. Ces produits pourront être ensuite recyclés dans un combustible nucléaire neuf.

Pour minimiser les niveaux de radioactivité des déchets liquides, des réactifs y modifient l'état chimique des molécules afin d'optimiser les possibilités de concentration et d'enrobage.

Des principes préalablement validés sur des usines pilotes

Les installations chimiques produisent d'une part des déchets liquides de haute et de moyenne activité qui seront vitrifiés, et d'autre part une petite quantité de déchets liquides de faible activité, qui sont traités par floculation et enrobés de ciment pour éliminer toute activité résiduelle avant d'être rejetés à la mer. L'ensemble des installations nécessaires à ce traitement est intégré dans un même bâtiment.

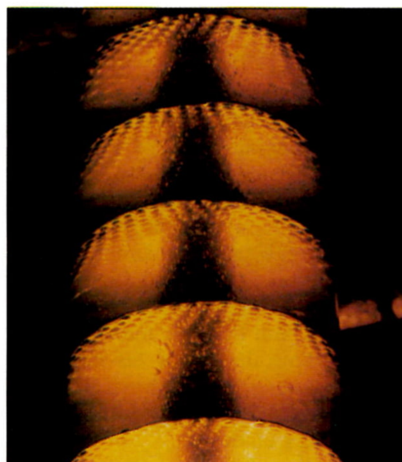
L'extraction par solvant dans les cycles hautement radioactifs (HR) et de purification du plutonium (PP) fait appel à des colonnes « pulsées » (voir encadré). Elles permettent une grande sûreté de fonctionnement même avec les combustibles les plus concentrés en plutonium.

Tous les équipements en contact avec les matières radioactives sont conçus de manière à nécessiter une maintenance minime ou nulle sur toute la durée de vie de l'usine. Aucune pièce mécanique mobile n'est utilisée dans les zones hautement radioactives de l'installation chimique et l'on emploie des systèmes fluidiques ou à air comprimé pour le pompage des liquides et l'instrumentation.

Pour mettre en œuvre les principes de conception décrits plus haut, un vaste programme de recherche et développement a été mené de la fin des années 1970 à la fin des années 1980[2]. Plusieurs installations pilotes ont été conçues, construites et exploitées durant cette période. Parmi elles : des répliques inactives en grandeur nature des principales zones de Thorp ; des installations pilotes d'échelle intermédiaire contenant du plutonium et fonctionnant en boîte à gants ; et des répliques à petite échelle, totalement actives, de la majeure partie de l'installation utilisant des combustibles usés. Parallèlement, de vastes évaluations pour la sécurité requise, et une série d'études fondamentales sur les aspects chimiques et mécaniques des procédés de Thorp ont été réalisées.

L'EXTRACTION DANS LES COLONNES PULSÉES DE THORP

Les installations de séparation chimique de Thorp utilisent des colonnes pulsées à plaques perforées pour séparer l'uranium et le plutonium des déchets de fission, séparer l'uranium du plutonium, et enfin purifier le plutonium ainsi isolé.



Dans les colonnes, des plaques perforées en acier inoxydable contribuent à l'efficacité du mélange et de la décantation.

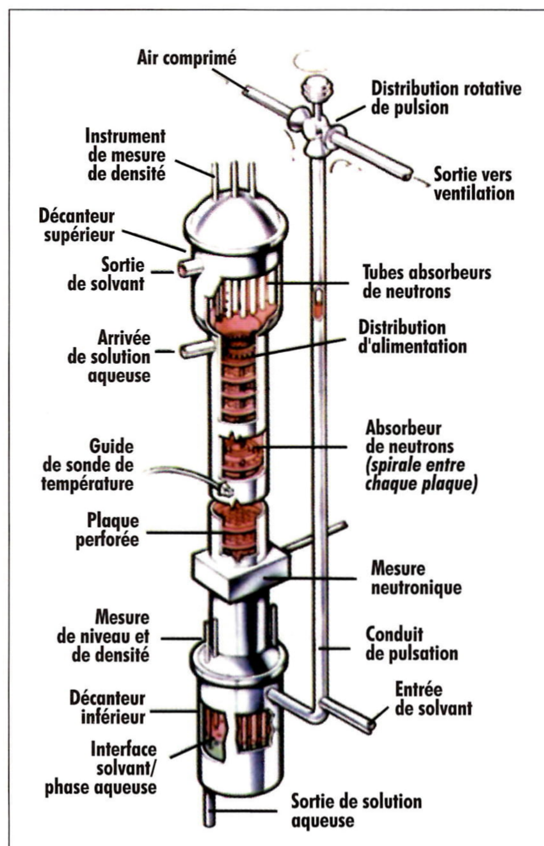
La séparation et la purification sont effectuées selon le procédé d'extraction par solvant « Purex », dont le principe est le suivant. Une solution acide aqueuse d'uranium et de plutonium est soumise à une agitation en présence d'un solvant, du kérosène contenant du tributyl phosphate (TBP). Le TBP absorbe l'uranium et le plutonium, alors que les produits de fission demeurent dans l'acide aqueux. On laisse ensuite la couche aqueuse se séparer du solvant. Des procédés similaires sont utilisés pour séparer l'uranium du plutonium, de même que pour purifier le plutonium.

La technique des colonnes pulsées permet de mettre en œuvre ce processus de mélange et de décantation en continu, à l'échelle industrielle. Thorp dispose de huit colonnes de ce type. Chacune est constituée d'un tube vertical en acier inoxydable de 300 mm de diamètre, de 6 à 10 mètres de haut, et contient une série de plaques horizontales en acier inoxydable perforées, espacées d'environ 50 mm. Le solvant est pompé en continu vers le haut de la colonne, d'où il s'écoule ensuite, alors que les gouttelettes de phase aqueuse, plus denses que le mélange kérosène/TBP, s'écoulent le long de la colonne au travers du solvant. Ces gouttelettes forment une couche aqueuse en bas de la colonne, sous l'interface solvant/phase aqueuse. La phase aqueuse est évacuée par un système de contrôle de l'interface qui assure le bon fonctionnement de la colonne. Un « bras à impulsions » vertical, fixé au bas de la colonne, est périodiquement comprimé avec de l'air puis relâché : cela génère un mouvement de haut en bas dans les liquides de la colonne et assure un mélange efficace de la phase aqueuse et du solvant. Les colonnes peuvent atteindre des débits combinés phase aqueuse/solvant de $60 m^3/h/m^2$ de section transversale. Très souples, elles fonctionnent également de façon efficace à des débits aussi faibles que $30 m^3/h/m^2$.

Les colonnes pulsées, le système de pulsation, et l'ensemble des instruments utilisés pour mesurer la position de l'interface, l'amplitude des pulsations, la température, la densité des phases et le flux de neutrons, ne contiennent aucune pièce mécanique mobile en contact avec les liquides radioactifs de la colonne. Les colonnes pulsées sont donc parfaitement adaptées à la séparation des matières nucléaires, car elles ne nécessitent aucune maintenance en zone radioactive.

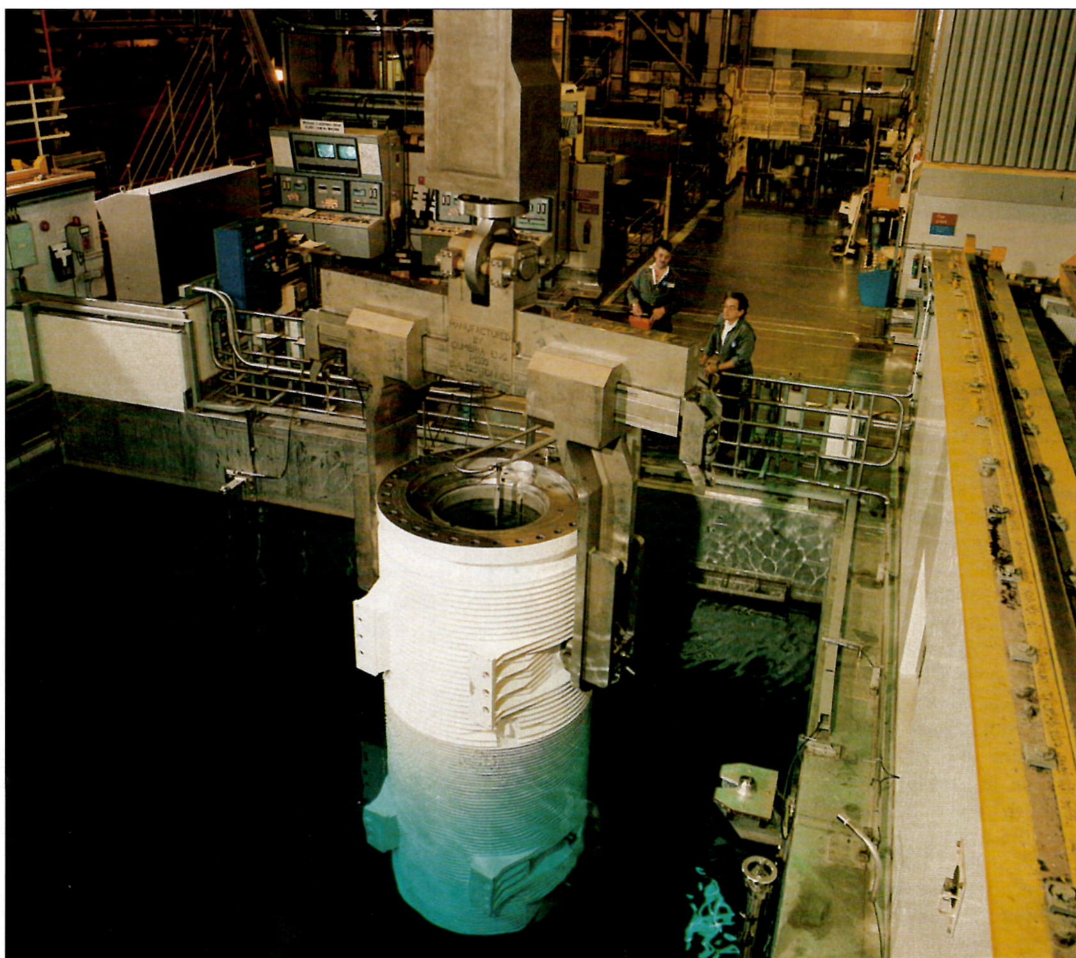
Grâce à leur forme fine et allongée, les colonnes pulsées peuvent contenir des concentrations de plutonium élevées tout en évitant les risques de criticité nucléaire associés aux systèmes plus massifs d'extraction par contact de solvant, tels que les mélangeurs-décanteurs.

D'autre part, le temps de séjour relativement bref des liquides minimise la durée de contact du TBP avec la phase aqueuse radioactive, ce qui limite la dégradation radioactive du solvant.



Cette vue en coupe d'une colonne pulsée de Thorp montre les nombreux dispositifs de contrôle mis en place pour suivre le bon déroulement de l'extraction.

Une fois le combustible retiré, le conteneur de transport est sorti de la piscine de stockage afin d'être réutilisé pour un nouveau transport.



La mise en service de Thorp a été réalisée en cinq étapes[3] :

1) mise en service des équipements mécaniques et des installations pour les eaux, contrôle des dispositifs de pompage des liquides, étalonnage des cuves ;

2) test au moyen de solides inactifs des équipements servant à manipuler les solides dans l'installation de traitement initial (cisaillement et dissolution), et dans les zones destinées au trioxyde d'uranium et au dioxyde de plutonium ;

3) mise en service des installations allant recevoir l'acide nitrique et le solvant (TBP/kérosène), afin de régler et tester les paramètres de dissolution, les équipements d'extraction par solvant, et d'effectuer le réglage initial des instruments de commande ;

4) mise en service des installations allant mélanger uranium, acide nitrique et solvant pour obtenir des données sur la dissolution du combustible non usé, sur les transferts dans les colonnes pulsées et sur les maxima de production. Affinage du réglage des instruments et des commandes ;

5) mise en service des installations destinées à recevoir le combustible usé, l'acide nitrique et le solvant pour tester le processus complet, avec différents combustibles d'irradiation croissante, et un temps de refroidissement décroissant. Contrôle de la qualité des produits d'uranium et de plutonium et validation des concentrations de flux de déchets.

Dans l'ensemble, les travaux de mise en service ont été réalisés avec succès et sans difficulté. Le fonctionnement et les performances de l'usine se sont révélés conformes aux prévisions des essais de développement sur les installations pilotes. Tous les tests de mise en service des installations actives ont été achevés mi-1997, à l'entière satisfaction de l'inspection des installations nucléaires et de l'agence pour l'environnement britannique, UK Nuclear Regulators.

Les performances de l'usine Thorp ne sont aujourd'hui plus à démontrer. Les produits d'uranium et de plutonium de Thorp sont parfaitement adaptés au recyclage en combustibles nucléaires neufs[4,5], comme le montrent les faibles teneurs de certains grands contaminants en comparaison des normes internationales.

Une usine adaptée au recyclage en combustibles à oxydes mixtes

Une usine de démonstration de Sellafield a déjà utilisé du plutonium dans un combustible à oxydes mixtes (MOX). Par ailleurs, des études en cours d'achèvement ont déjà démontré que l'uranium de Thorp était adapté à la production de combustible neuf destiné aux réacteurs graphite-gaz britanniques. Les pertes d'uranium et de plutonium dans les flux de déchets de Thorp n'excèdent pas respectivement 0,19 % et 0,22 %, ce qui fait de cette installation un processus de recyclage efficace. Pour ce qui est des déchets, plus de 98,4 % de leur activité est concentrée dans le volume très limité du produit vitrifié. Celui-ci peut être stocké indéfiniment, de façon simple et sûre.

La quasi-totalité de l'activité restante est confinée dans l'enrobage de ciment qui occupe moins de 0,5 m^3 par tonne d'uranium retraité, et assure un stockage à long terme satisfaisant. L'activité des déchets faiblement actifs représente moins de 4 à 5 % de l'activité totale du combustible retraité, et respecte parfaitement l'objectif théorique de 10 % des rejets totaux du site de Sellafield.

La conception, la construction et la mise en service de THORP représentent le projet le plus délicat jamais entrepris par BNFL. Cette usine fait un usage innovant d'une technologie de retraitement bien connue, dans le but, d'une part de minimiser le nombre d'étapes de traitement requises et de répondre au cahier des charges de qualité des produits, et d'autre part de minimiser le nombre de flux de déchets générés. La conception de l'installation garantit une grande sûreté d'exploitation. A la mise en service de l'unité de production du combustible MOX, Thorp prendra toute sa dimension au cœur des services de retraitement de BNFL. ■

(1) I.S. Denniss, C. Philipps, *Proc. ISEC '90*, Elsevier, p. 549-554, 1992.

(2) C. Phillips, *Trans. I. Chem., E. 71(A)*, p. 132-142, 1993.

(3) C. Phillips, C. Hamilton, *Proc. ISEC'93*, SCI Londres, p. 1463-1470, 1993.

(4) C. Phillips, *Proceedings Waste Management'99 Conference*, Tucson, USA, mars 1999. A paraître

(5) C. Phillips, *Proceedings RECOD '98 Conference*, Nice, France, octobre 1998. A paraître.

Les progrès de la chimie du recyclage

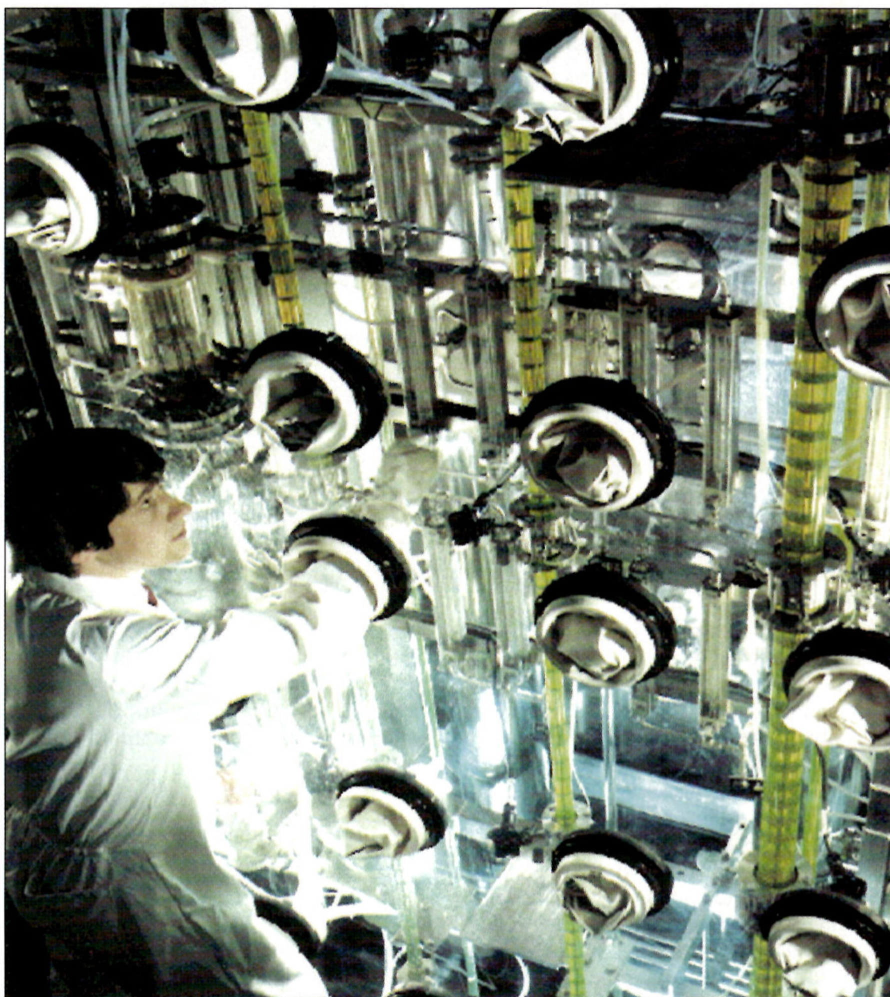
Le recyclage des combustibles usés met en œuvre des procédés chimiques qui ne cessent d'évoluer. BNFL a misé sur l'extraction par solvant. Cette technique connaît des développements permanents qui en font toujours une solution d'avenir.

CHRIS PHILLIPS

BNFL recycle des combustibles nucléaires usés sur son site britannique de Sellafield depuis près de cinquante ans. Alors que les premières usines de recyclage, nord-américaines ou russes, employaient des méthodes de précipitation, le procédé d'extraction par solvant s'est imposé depuis la fin des années 1950. L'extraction par solvant est la seule méthode utilisée à Sellafield.

La première installation de recyclage sur ce site a été mise en service en 1952. Elle utilisait le procédé d'extraction par solvant « Butex ». Pour traiter le combustible uranium métallique irradié, produit par les réacteurs nucléaires d'origine de type « Pile », le solvant employé était le di-butyl carbitol. Cette installation faisait appel à des colonnes à garnissage, non pulsées, qui permettaient la mise en contact de la phase d'extraction par solvant et de la phase aqueuse.

Après la mise en œuvre réussie aux Etats-Unis du procédé « Purex », qui utilise pour solvant le tri-butyl phosphate, une nouvelle installation de recyclage à mélangeur-décanteur a été mise en service à Sellafield en 1964. Cette installation, qui recycle l'ensemble des combustibles métalliques des réacteurs Magnox britanniques, a déjà recyclé plus de 40 000 tonnes de combustible. Elle fonctionne encore aujourd'hui.



Dans l'installation pilote d'échelle intermédiaire, pas moins de sept colonnes sont placées dans la boîte à gant. Son rôle est de valider le passage de l'échelle miniature à un équipement grandeur nature.

Des nouveaux procédés d'extraction pour les combustibles oxydes

Avec l'arrivée des réacteurs à combustibles oxydes, au début des années 1970, il a fallu envisager de mettre au point une nouvelle installation pour les traiter : plus fortement irradiés, ils possèdent des caractéristiques physiques différentes. Le développement de l'installation de recyclage des combustibles oxydes pour réacteurs thermiques Thorp (Thermal Oxide Reprocessing Plant), dotée d'un procédé Purex modifié et de colonnes pulsées, a débuté au milieu des années 1970. L'ensemble de l'installation a été mis en service au début des années 1990.

Des travaux de recherche et de développement sur la chimie du recyclage, l'extraction par solvant et les équipements techniques nécessaires à l'exploitation industrielle sont réalisés à Sellafield depuis la fin des années 1940. Ce type d'extraction nécessite un solvant qui présente une forte affinité pour l'uranium et le plutonium. En revanche, son affinité pour les produits de fission et les transuraniens générés lors de l'irradiation des combustibles nucléaires doit être quasi nulle.

Depuis la fin des années 1950, toutes les installations de recyclage faisant appel à la technique d'extraction par solvant utilisent le tri-butyl phosphate (TBP). Il s'agit d'un liquide huileux, de densité similaire à celle de l'eau, que l'on dilue généralement à 20 % ou 30 % dans du kérosène « inodore », ou « OK » (Odourless Kerosene). Ce solvant est non miscible dans l'eau : il remonte pour « flotter » à la surface.

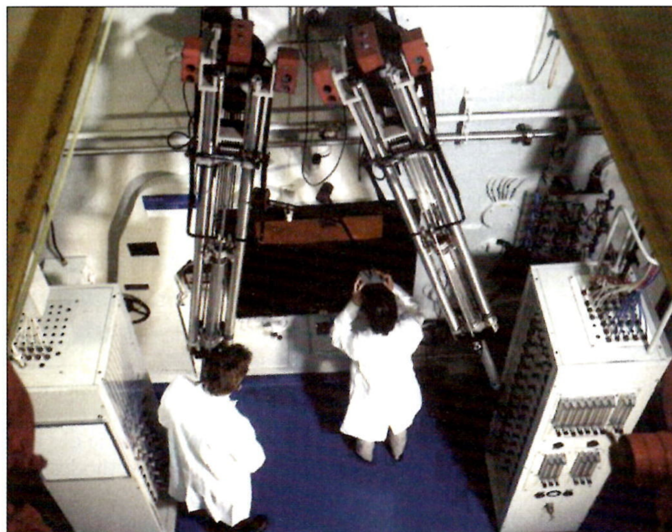
Le combustible nucléaire irradié est dissous dans l'acide nitrique. La solution ainsi obtenue est mélangée avec du TBP/OK, puis subit une décantation (schéma ci-contre). La couche de TBP/OK qui remonte à la surface contient alors la quasi-totalité de l'uranium et du plutonium, alors que la plupart des produits de fission et des transuraniens restent dans la couche acide. Les deux couches liquides sont séparées. Pour achever la séparation, cette opération

CHRIS PHILLIPS
Thorp Group, BNFL.

est répétée généralement à plusieurs reprises avec un solvant propre. Le TBP/OK chargé d'uranium et de plutonium est « nettoyé » avec un acide neuf.
Les opérations répétées de mélange et de décantation sont effectuées dans un « contacteur » d'extraction par solvant. Il existe différents types de contacteurs, qui reposent tous sur un principe d'écoulement à contre-courant : le solvant TBP/OK et l'acide aqueux s'y écoulent dans des directions opposées.
On procède ensuite à la séparation de l'uranium et du plutonium. Elle s'opère au cours d'un processus de réduction chimique du plutonium, qui, sous sa nouvelle forme, ne présente plus d'affinité pour le TBP/OK. Il est alors transféré vers une phase aqueuse acide neuve, dans un autre contacteur d'extraction par solvant. L'uranium est alors lui aussi transféré du solvant vers une phase aqueuse neuve, par réduction de l'acidité dans un contacteur de « ré-extraction ».
Lors du recyclage, il est nécessaire de mettre en œuvre plusieurs cycles d'extraction, afin d'obtenir le degré de pureté recherché du plutonium et de l'uranium.

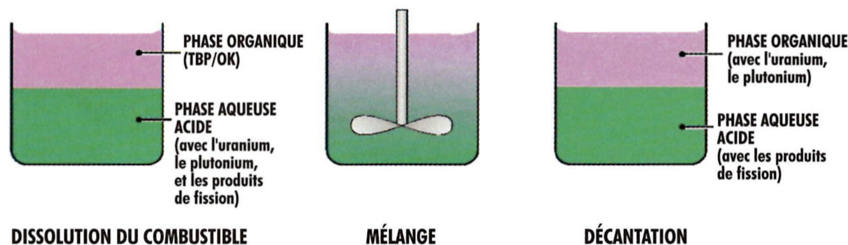
Des choix techniques validés par des installations pilotes

Bien que le solvant TBP/OK ait été choisi pour n'avoir pas d'affinité avec les produits de fission et les transuraniens contenus dans le combustible nucléaire usé, certains sont toutefois extraits au cours des cycles que nous avons décrits. On peut citer le neptunium (selon son état d'oxydation[1]), le ruthénium (qui forme avec l'acide nitrique une série de complexes, dont certains sont extractibles), le technétium (qui forme des complexes extractibles avec l'uranium, le plutonium et le zirconium[2]), et enfin, le zirconium (qui lorsqu'il est seul devient extractible en présence d'une quantité suffisante de technétium). Plusieurs projets de recherche se poursuivent pour développer des procédés et des équipements capables de minimiser l'extractibilité de ces contaminants. Ils portent essentiellement sur la « saturation » du TBP/OK par l'uranium et le plutonium, le contrôle soigneux des conditions oxydantes et de l'acidité, la régulation de la température du procédé et l'usage d'agents complexants.
Examinons maintenant les équipements des installations de recyclage qui permettent de mettre en œuvre les principes décrits ci-dessus. Plusieurs types de contacteurs d'extraction par solvant peuvent être mis en œuvre : les mélangeurs-décanteurs, les colonnes (pulsées ou non) et les contacteurs centrifuges. Tous ont été développés à Sellafield. Les colonnes non pulsées ont été employées dans l'installation Butex, qui était la première du site de Sellafield. Peu efficaces, ces colonnes devaient mesurer au moins trente mètres de haut pour atteindre le rendement d'extraction recherché. L'installation de recyclage des combustibles Magnox fait appel à un mélangeur-décanteur. Ce concept tire parti de la différence de densité entre le TBP/OK et la phase aqueuse, par un écoulement à contre-courant sur des plans inclinés ne nécessitant aucun pompage supplémentaire. L'usine Thorp est équipée de colonnes pulsées. Grâce à leur rendement supérieur, les colonnes ne mesurent qu'une dizaine de mètres. En outre, elles permettent de traiter des concentrations plus élevées en plutonium, dans des conditions de sûreté accrues vis-à-vis du phénomène de criticité. Enfin, le faible temps de séjour du solvant limite son irradiation et sa dégradation.



Les équipements de l'installation pilote miniature pour les produits hautement radioactifs sont placés dans des casemates en béton, pour assurer la protection du personnel.

La conception des équipements d'une installation de recyclage requiert d'éviter l'emploi de pièces mobiles au contact des matières radioactives. A Sellafield, le choix des équipements a permis, dans la plupart des cas, d'éviter toute pénétration pour maintenance dans des enceintes à blindage radioactif, et ce, pendant toute la durée de vie des installations. Parmi ces équipements figurent des systèmes élévatoires pneumatiques, des nouvelles technologies pour le pompage des liquides et l'agitation des cuves, des « tubes à bulle » pour la mesure des niveaux et densités de liquides, des systèmes permettant de dévier les liquides d'une destination vers une autre sans avoir recours aux vannes traditionnelles, des instruments pour les mesures chimiques et radiochimiques automatiques, des systèmes d'échantillonnage à distance, et des systèmes de télémesure de l'uranium et du plutonium.
Les trois usines de recyclage de Sellafield ont nécessité la construction d'une série d'installations pilotes pour le développement et le contrôle des équipements[3]. Pas moins de six pilotes ont été utilisés lors du développement de Thorp (voir tableau page suivante).
Intéressons-nous tout d'abord aux installations destinées au développement de la chimie du recyclage. L'installation pour l'activité alpha se compose d'une série de colonnes pulsées miniatures en verre de 10 mm de diamètre et 2 m de haut, et de mélangeurs-décanteurs en Plexiglas, disposés de façon à reproduire les cycles d'extraction par solvant de Thorp. L'emploi de boîtes à gants a permis de manipuler de l'uranium, du plutonium, du technétium et du zirconium, et d'étudier en détail leur comportement pendant l'extraction.
Dans l'installation pilote miniature pour les produits hautement radioactifs, on trouve des colonnes pulsées et des mélangeurs-décanteurs similaires à ceux de l'installation précédente, mais logés dans des casemates permettant l'utilisation du combustible irradié. Cette installation a fonctionné 24 heures sur 24, au cours de campagnes d'une durée maximale de 20 jours. Tous les flux d'alimentation, de produits et de liquides inter-contacteurs ont été échantillonnés et analysés quotidiennement. La présence de tous les composants radioactifs d'alimentation a permis d'identifier l'ensemble des interactions chimiques susceptibles de se produire au sein de Thorp. Une interaction



entre le technétium et le zirconium a ainsi été identifiée, et son effet sur la chimie de séparation uranium-plutonium a été pris en compte pour la conception de Thorp.
L'installation d'échelle intermédiaire, au 1/250e, se compose de sept colonnes pulsées en verre mesurant 25, 40 et 50 mm de diamètre, et 5,25 m de haut. Elles sont équipées de plaques perforées en acier inoxydable, similaires aux colonnes de grandeur réelle. L'ensemble de l'installation pilote est logé dans une boîte à gants qui permet l'ajout de plutonium et de technétium à la charge d'alimentation en uranium. Ce pilote a été utilisé pour des études portant sur l'influence du passage d'un équipement de taille miniature à un équipement de taille réelle. Il a également permis d'effectuer une série complète d'essais de fausses manœuvres, et de simulations de démarrage et d'arrêt. Les résultats ont constitué un élément essentiel du dossier de sûreté, exigé par les organismes réglementaires préalablement à l'autorisation de mise en service et d'exploitation de Thorp.
Le banc d'essai des colonnes pulsées, à l'échelle 1, utilise de l'uranium, de l'acide nitrique et du TBP/OK. Il est capable de les recycler indéfiniment. Exploité pendant des campagnes prolongées d'une durée de plusieurs mois, il a permis de tester la plupart des équipements développés pour Thorp dans les conditions réelles d'exploitation.
Les principaux travaux de développement ont concerné :
— le débit liquide des colonnes pulsées et l'efficacité du transfert de matière ; l'efficacité de la séparation des phases dans les colonnes pulsées ;
— le contrôle de l'écoulement à l'aide d'instruments ne contenant aucune pièce mobile ;
— les interactions d'une colonne pulsée avec une autre lors d'un cycle d'extraction et la réponse aux perturbations ;

La modélisation mathématique, un complément du pilote

— le développement de systèmes et de modèles mathématiques pour la pulsation pneumatique des colonnes ;
— les méthodes de détection des fausses manœuvres et de l'évaluation de leurs conséquences ;
— le développement d'une instrumentation exempte de pièces mobiles ;
— le développement de modèles mathématiques dynamiques.
L'installation à colonne pulsée unique de 150 mm, à l'échelle 1, est constituée d'une colonne en acier inoxydable. Elle est installée de façon à simuler successivement les différentes parties d'un cycle d'extraction par solvant. Elle a permis le développement des équipements du cycle de purification du plutonium de Thorp, selon un programme de travail similaire à celui du banc d'essai des colonnes pulsées.
Enfin, l'installation d'étude de l'hydraulique des colonnes se compose d'une colonne pulsée en verre équipée de plaques en acier inoxydable, mesurant 225 mm de diamètre et 14 m de haut. Elle a été utilisée pour :
— étudier le comportement hydraulique des colonnes pulsées, et notamment la capacité de charge de la phase dispersée et les caractéristiques de noyage ;
— développer et tester les dispositifs de distribution de l'alimentation ;
— développer des systèmes exempts de pièces mobiles pour la détection et le contrôle de l'interface entre le solvant et la phase aqueuse dans une colonne pulsée ;
— générer des données permettant de développer et de vérifier les modèles mathématiques du système de pulsation pneumatique.
Tous les procédés d'extraction par solvant ont bénéficié d'une modélisation mathématique. Celle-ci est validée par les données collectées au niveau de l'ensemble des installations pilotes. Des modèles prévoyant de façon fiable le comportement hydraulique et chimique de tous les contacteurs sont aujourd'hui disponibles. Ainsi, il est possible de concevoir des installations d'extraction par solvant sans avoir recours à des pilotes.
Quelles sont les évolutions à prévoir quant à la chimie du recyclage ? BNFL estime que le recyclage restera une solution intéressante pour la gestion des combustibles usés de demain. Les travaux de développement se poursuivent donc à Sellafield. Ils sont tournés dans deux directions principales. La première concerne le recyclage des combustibles à taux de combustion très élevé et des combustibles à oxydes mixtes (MOX) par

Installations pilotes construites pour le développement de Thorp

Installation pilote	Charge d'alimentation	Echelle	Principales dimensions	Durée d'une campagne type	Commentaires
Installation alpha-active	uranium, acide nitrique, TBP/OK	1/6000	Colonne pulsée diamètre 10 mm hauteur 2 m	7 jours	Equipement en boîtes à gants de laboratoire
Installation pilote miniature hautement radioactive	Combustible irradié de RGG et REL, acide nitrique, TBP/OK	1/6250	Colonnes pulsées diamètre 10 mm hauteur 2 m	20 jours	Equipement en casemates béton et boîtes à gants
Installation pilote d'échelle intermédiaire	uranium plutonium, technétium, zirconium, acide nitrique, TBP/OK	1/250	Colonnes pulsées diamètre 25-50 mm, hauteur 8,5 m Boîte à gants 6,5x11,5x1m	7-12 jours	Recyclage de l'alimentation pouvant permettre une durée de fonctionnement illimitée
Banc d'essai des colonnes pulsées	uranium, acide nitrique, TBP/OK	1/1	Colonnes pulsées diamètre 250-350 mm hauteur 8-12 m	1-11 mois	Fonctionnement continu avec recyclage de l'uranium
Installation à colonne unique de 150 mm	uranium, acide nitrique, TBP/OK	1/1	Colonne pulsée diamètre 150 mm hauteur 8 m	1-8 semaines	Fonctionnement discontinu
Installation d'hydraulique colonnaire	acide nitrique, TBP/OK	1/1	Colonne pulsée diamètre 225 mm hauteur 14 m	1 jour	Colonne pulsée en verre
Banc d'essai des systèmes élévatoires pneumatiques	uranium, acide nitrique, TBP/OK	1/1	Colonnes élévatoires pneumatiques diamètre 15-80 mm hauteur 5-35 m	1 jour	Colonnes élévatoires pneumatiques en verre

Cette colonne, haute de 14 mètres, a permis d'étudier le comportement hydraulique des colonnes pulsées.



Thorp. L'important volume de données générées par le programme de développement de Thorp a permis d'élaborer des schémas de principe pour ce type de recyclage. Ils sont validés avec les modèles mathématiques.
Le second axe de développement, Radical Purex, concerne l'amélioration des principes et des procédés de recyclage. En comparaison des anciennes installations de recyclage, Thorp permet une réduction du coût et de l'impact sur l'environnement du recyclage. BNFL a lancé le programme Radical Purex pour obtenir de nouvelles réductions. Ses principaux objectifs sont les suivants[4] :
— transformer, dans la mesure du possible, les procédés discontinus en procédés continus ;
— réduire le nombre d'étapes des procédés et les flux d'effluents ;
— réduire la taille générale des équipements et de l'installation.

Radical Purex, un programme d'étude pour l'avenir

En termes de dissolution, le principal but du programme Radical Purex est de transformer celle-ci d'un procédé discontinu, comme dans le cas de Thorp, en un procédé continu. La solution la plus adaptée est la dissolution électrochimique[5]. Elle regroupe les actuels procédés de tronçonnage et de dissolution en une seule opération, et simplifie le traitement des déchets, car le flux contenant les « coques » de gainage n'existe plus. Plutôt que de faire appel à la vitrification, cette technique permet aussi de privilégier le conditionnement des déchets de haute activité sous une forme céramique. La matrice d'enrobage est alors formée par le dioxyde de zirconium des gaines de combustible. La dissolution électrochimique des assemblages de combustibles est effectuée par application d'un potentiel électrique dans un électrolyte (ici, l'acide nitrique). Si ce potentiel est suffisamment élevé, le gainage, en zircaloy ou en acier inoxydable, devient réactif et se fragmente ou se dissout.
Les travaux relatifs à l'extraction par solvant sont centrés sur un schéma de principe à cycle unique, faisant appel à des contacteurs centrifuges. Il permet, en comparaison de Thorp, de réduire le nombre de contacteurs d'extraction et les flux d'effluents. Les dimensions de l'ensemble, en particulier de la hauteur des contacteurs, sont réduites. En outre, dans le procédé Thorp, la plus grande partie du neptunium suit le flux d'uranium jusqu'au cycle de purification, où il est éliminé. BNFL a développé des réactifs permettant la ré-extraction du neptunium dans ce schéma de principe à cycle unique[6]. Pour maîtriser cet élément, de vastes travaux de développement sur les acides carboxyliques et hydroxamiques ont été réalisés[7]. Enfin, des modélisations mathématiques et des essais d'extraction par solvant à contre-courant ont été effectués pour valider cette technique[8,11,12].
Des études parallèles[9,10] de conception et d'évaluation ont montré que les procédés proposés pour l'installation Radical Purex étaient réalistes et potentiellement capables de générer une économie minimale de 30 % par rapport au coût de l'installation Thorp et des procédés associés. Il a été également démontré que des approches de conception plus radicales articulées autour des concepts de minimisation de la charge en œuvre des installations, de standardisation des équipements, d'amélioration de l'instrumentation et du contrôle et de déclassement *in situ*, étaient capables de contribuer à réduire encore les coûts d'une usine future[13].
Au fil des ans, BNFL a accumulé une vaste expérience en matière de développement et d'exploitation de la chimie des procédés et des équipements de recyclage des combustibles nucléaires. Les travaux menés pour que le recyclage reste une solution intéressante pour la gestion des combustibles nucléaires irradiés offrent divers avantages en termes de simplification des schémas de principes, de réduction des flux de déchets, de réduction de la taille des équipements. Ils serviront de base à la conception des installations de recyclage de demain. ■

(1) I.S. Denniss, C. Phillips, Actes de la conférence internationale sur l'extraction par solvant de Kyoto, Japon, 16-21 juillet 1990, exposé 04-02, pp. 549-554, Elsevier, 1992.
(2) J. Garraway, Symposium IchemE, série 88, pp. 47-56, 1984.
(3) C. Phillips, Trans IChemE, vol 71, partie A, mars 1993, pp. 134-142.
(4) R.J. Taylor, P. Wylie, P. Parkes, Actes de Global'99, vol. 1, pp. 246-249, 1999.
(5) P. Rance, Actes de la 5e conférence nucléaire internationale sur le recyclage, le conditionnement et l'élimination (RECOD 98), Nice, 25-28 octobre, vol. 1, 156-163, 1998.
(6) R.J. Taylor, I.S. Denniss, et A.L. Wallwork, L'énergie nucléaire, 36, 39-46, 1997.
(7) R.J. Taylor *et al.*, J. Alliages et composés, 271-273, pp. 534-537, 1998.
(8) A.L. Wallwork *et al.*, L'énergie nucléaire, 38, 31-35, 1999.
(9) R.J. Taylor *et al.*, Actes de la 5e conférence nucléaire internationale sur le recyclage, le conditionnement et l'élimination (RECOD 98), Nice, 25-28 octobre, vol. 1, 417-423, 1998.
(10) A.L. Wallwork et al., Actes de la conférence internationale sur l'extraction par solvant (ISEC 99), Barcelone, 11-16 juillet, publication en cours, 1999.
(11) I. May, R.J. Taylor, et G. Brown, J. Alliages et composés, 271-273, pp. 650-653, 1998.
(12) R.J. Taylor *et al.*, ISEC, Actes de la conférence internationale sur l'extraction par solvant (ISEC 99), Barcelone, 11-16 juillet, publication en cours, 1999.
(13) B.C. Hanson, R.J. Taylor, P. Parkes, RECOD 98, Nice, 893-899, 1998.

L'alternative du combustible MOX

Comment valoriser le combustible usé ? En extrayant les matières fissiles qu'il contient pour en faire un autre combustible : le MOX. Aujourd'hui, il rivalise en termes de performance avec le dioxyde d'uranium.

PETER HARRINGTON, PAUL COOK, DAVID FARRANT, ANDY WORRALL

Une partie de l'énergie obtenue avec le combustible standard, le dioxyde d'uranium UO_2, provient toujours de la fission de noyaux de plutonium qu'il contient. En outre, du plutonium est produit durant le fonctionnement normal des réacteurs nucléaires commerciaux. D'où l'idée de produire un combustible qui serait enrichi avec du plutonium extrait des combustibles nucléaires usés, et approprié à une nouvelle utilisation dans les réacteurs nucléaires commerciaux. BNFL, au moyen d'installations telles que THORP (Thermal Oxide Reprocessing Plant) à Sellafield, s'est engagé dans cette voie.

Le plutonium et l'uranium sont séparés du combustible nucléaire usé dans ces usines de recyclage. Le plutonium, récupéré sous forme d'oxyde (PuO_2), peut alors être combiné avec davantage de dioxyde d'uranium pour former un combustible à oxydes mixtes (MOX). L'utilisation du MOX permet de diminuer aussi bien la consommation du minerai d'uranium que les exigences d'enrichissement du combustible. Ce combustible représente également un élément clé pour boucler le cycle du combustible nucléaire.

Le combustible MOX est fabriqué à partir de poudres d'UO_2 et de PuO_2. Les proportions sont de l'ordre de 5 % de PuO_2 et de 95 % d'UO_2. La quantité précise de plutonium est déterminée par le rendement énergétique désiré. Afin de mélanger ces poudres, et de produire des pastilles de combustible céramique MOX, BNFL a développé un processus technologique appelé « Short Binderless Route (SBR) », c'est-à-dire, « processus réduit sans liant ». Il permet d'obtenir un produit très homogène, gage d'une bonne performance dans le réacteur. Quel est son principe ?



Une fois assemblés, les crayons de combustible MOX neufs sont stockés dans des puits de stockage refroidis en attente d'être expédiés aux clients.

Un nouveau processus pour créer un combustible très homogène

Le premier élément du processus SBR est un broyeur opérant par friction. Il décompose les agglomérats, pour produire une fine poudre d'un mélange homogène d'UO_2 et de PuO_2. La taille des particules est alors de l'ordre du micromètre. Les temps de broyage nécessités par ce processus sont considérablement inférieurs à ceux requis pour obtenir les mêmes résultats avec un broyeur traditionnel. Le broyat est ensuite retransformé en granules, dans un dispositif dit de « sphéroïdisation ». Il conduit à une agglomération des particules de poudre. La matière granuleuse obtenue présente de bonnes caractéristiques d'écoulement, facteur important pour l'étape suivante : le frittage. Un bon contrôle des conditions de broyage et de sphéroïdisation permet de produire une matière de bonne qualité, de façon constante. Après la granulation, la poudre est comprimée en pastilles. Durant cette étape, la densité des pastilles est habituellement de 6,5 gcm^{-3}. Elles sont ensuite frittées dans un four à 1 750 °C, dans une atmosphère d'argon et d'hydrogène : la densité atteint alors environ 10,45 gcm^{-3}. Les atomes de plutonium et d'uranium diffusent pour former une céramique homogène dont la taille des grains est d'environ 8 microns (voir carte EDS, page 33).

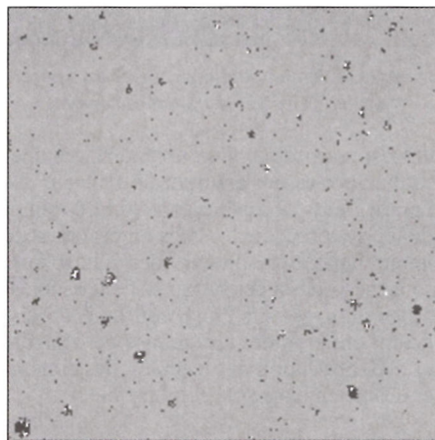
La principale différence entre les pastilles de combustible UO_2 et de combustible MOX est la distribution microscopique de la matière fissile. Dans le combustible UO_2, l'isotope fissile ^{235}U est régulièrement distribué, à l'échelle atomique, dans la pastille, alors que dans les pastilles MOX, le PuO_2, la principale matière fissile, est étroitement mélangé à l'UO_2. Deux autres aspects pour le bon fonctionnement du réacteur ont également été largement étudiés : la conductivité thermique et le fluage (c'est-à-dire l'aptitude à la déformation sous l'effet de la pression) du combustible. Le processus de fission

PETER HARRINGTON, et **PAUL COOK,** BNFL, Sellafield.
DAVID FARRANT, ANDY WORRALL BNFL, Springfields.

chauffe le combustible, et cette chaleur doit être transférée du centre des pastilles vers le réfrigérant du réacteur. Le transfert de chaleur dans les matières céramiques telles que l'UO_2 s'effectue principalement par des vibrations atomiques (phonons) dans le réseau cristallin. Le plutonium agit en tant qu'impureté dans le réseau UO_2 : il disperse les phonons et entraîne une réduction de la conductivité thermique du combustible MOX d'environ 8 % par rapport à l'UO_2. Pour une même puissance fournie, le crayon de combustible MOX SBR est plus chaud.
Le problème du fluage vient, quant à lui, du fait que les tubes de gainage, en zircaloy, entrent en contact avec les pastilles de combustible durant l'irradiation, et ce pour différentes raisons telles que la dilatation thermique des pastilles durant le chauffage.

Un rendement et des performances similaires aux combustibles classiques

Le contact provoque une pression sur le tube, et la déformation relative que la pastille et la gaine peuvent subir au moment du contact est déterminée par leur vitesse de fluage. Les expériences effectuées pour BNFL ont montré que la vitesse de fluage thermique du MOX SBR peut être d'un ordre de grandeur différent de celui de l'UO_2 selon les conditions de pression et de température de l'expérience. Les pastilles de combustible subissent également un fluage à la suite du processus même de fission. Cette composante du fluage est athermique, et s'accroît jusqu'à huit fois dans le combustible MOX par rapport au combustible UO_2. Par conséquent, la vitesse de fluage totale du MOX durant l'irradiation est, d'une façon significative, plus élevée que celle du combustible UO_2.
L'irradiation transitoire à haute puissance du combustible MOX dans les réacteurs d'essai a montré que ce dernier est moins sensible à la rupture et à l'endommagement de sa gaine que le combustible UO_2. Ceci est dû en partie au fluage accru. Aussi, aucune rupture de gaine MOX n'a été rapportée au cours des essais.
Les pastilles de combustible MOX peuvent donc être introduites dans des tubes de zircaloy scellés pour former des crayons de combustible de la même façon qu'avec le combustible UO_2. Ces crayons sont ensuite assemblés dans des grilles pour le chargement du réacteur. La puissance électrique totale de chaque assemblage combustible peut être supérieure à 200 millions de kilowattheures (kWh). L'usine SMP (Sellafield Mox Plant) de BNFL est conçue pour réaliser toutes les étapes du processus de transformation des poudres de PuO_2 et d'UO_2 en assemblages de combustible MOX. Ils serviront dans les réacteurs REP (réacteurs à eau pressurisée) et REB (réacteurs à eau bouillante) du monde entier. Est-il besoin de le préciser ? Des automatismes industriels et d'importants blindages sont utilisés à toutes les étapes pour minimiser l'exposition des travailleurs aux rayonnements.
Il est courant aujourd'hui pour les compagnies électriques qui procèdent à un cycle de combustible complet de charger approximativement 30 % du cœur de leur réacteur avec des assemblages MOX, le reste étant de l'UO_2 standard. Par conséquent, l'obtention, à partir du combustible MOX, d'un rendement énergétique et d'une performance de réacteur similaire à ceux obtenus avec le UO_2 est un objectif clé, aussi bien pour les exploitants de réacteurs que pour les fabricants de combustible. Au moment de fournir les assemblages de combustible pour un réacteur, il est donc nécessaire de spécifier leur teneur fissile. Pour les assemblages UO_2, cette tâche est aisée, puisque la teneur fissile dépend simplement de l'enrichissement en ^{235}U. Pour un assemblage MOX, la tâche est plus ardue car la teneur fissile dépend à la fois de la concentration de plutonium dans la matrice d'UO_2, et de la composition isotopique du plutonium, ou « vecteur Pu ». Dans les réacteurs traditionnels, les isotopes ^{239}Pu et ^{241}Pu sont fissiles, alors que d'autres, tel que le ^{240}Pu, absorbent les neutrons. Le vecteur Pu peut varier considérablement selon le type de combustible recyclé, et selon la durée écoulée entre le déchargement du combustible, le recyclage et la fabrication du MOX. Le paramètre utilisé pour mettre en correspondance l'énergie obtenue à partir de l'assemblage MOX et de l'assemblage UO est la durée de vie moyenne de la réactivité (Lifetime Average Reactivity — LAR). La réactivité d'un assemblage combustible est sa contribution à la réaction en chaîne de fission. Le paramètre LAR est donc la réactivité moyennée sur la durée de vie de l'assemblage dans le réacteur. Il permet de garantir théoriquement que le réacteur délivrera une énergie totale iden-tique quel que soit le type d'assemblage. Le concepteur du cœur prend en compte le LAR afin de fixer la teneur en PuO_2 des pastilles pour un rendement énergétique et un vecteur Pu donnés.
En termes de comportement global du réacteur, l'incorporation d'assemblages MOX dans un cœur UO_2 peut avoir des effets considérables. Toutefois, pour une fraction typique de 30 %, selon la qualité fissile du plutonium, les variations demeurent modestes, et tous les paramètres de sécurité sont réunis. Cela confirme qu'en termes de performance globale du cœur, les implications du chargement de combustible MOX sont minimes et bien comprises. En termes de performance, une série d'essais d'irradiation et d'expériences de laboratoire effectuées pour BNFL ont montré que la faible teneur en plutonium et sa distribution homogène dans la pastille permettent d'obtenir, pratiquement sous tous les rapports, une performance du MOX SBR identique à celle de l'UO_2 traditionnel. De petites différences existent néanmoins. Elles sont dues à des dimensions de grain de plutonium plus petites, à un point de fusion légèrement inférieur (la variation est de l'ordre de 2 %), ou encore à un plus grand nombre d'actinides dans les pastilles.
Les modifications des propriétés des pastilles de combustible, qui résultent de la présence de petites quantités de plutonium dans le combustible, sont correctement représentées dans les codes informatiques de modélisation utilisés pour prévoir le comportement des crayons de combustible. Les concepteurs disposent ainsi d'un outil fiable pour exploiter au mieux ce combustible. ■



Carte EDS (spectroscopie dispersive de rayons X) de la distribution du plutonium dans 1 mm² de combustible MOX SBR. La composition moyenne en plutonium dans cette pastille de combustible est de 8 %. La plus grande partie du plutonium forme une solution solide avec la matrice d'UO_2. Il demeure un petit nombre d'îlots (moins de 2 % du volume de la pastille), mais aucun ne contient plus de 60 % de plutonium.



L'usine de production du MOX est située à proximité directe de Thorp, d'où provient le plutonium recyclable.

Le recours à l'automatisation

La production du combustible nucléaire est une opération complexe qui doit être menée à distance et soigneusement contrôlée. Pour sa nouvelle usine de production du MOX, BNFL a largement fait appel à l'automatisation dans un concept global.

IAN MORTON ET GEORGE BURROWS

L'usine MOX de Sellafield (SMP – Sellafield Mox Plant) est une nouvelle installation de fabrication de combustible à oxydes mixtes. Conçue pour produire 120 tonnes de MOX chaque année, elle représente un investissement de plusieurs millions de livres sterling. Il s'agit de l'installation de ce type la plus moderne, la plus flexible et la plus automatisée au monde. Sa mise en service active est en cours sur le site BNFL de Sellafield.

La nature des matières retraitées servant à la fabrication du combustible neuf, et la limite admissible de dose de rayonnement perçue par les opérateurs imposent d'avoir recours à la télémanipulation à tous les stades du processus. BNFL a donc adopté un système de contrôle utilisant des technologies PC, PLC (automates programmables), SCADA (commande, surveillance et acquisition de données), ainsi que des bases de données. Les mesures effectuées au cours des processus et les informations relatives à la qualité des produits sont collectées sur PC, intégrés aux systèmes serveurs PLC et SCADA, et transmises à un ordinateur central qui assure l'archivage, la production de rapports de gestion, et la traçabilité des produits dans l'ensemble de l'usine.

Notons que les systèmes de protection sont conçus pour être totalement indépendants du système de contrôle.

Le système d'automatisation intégré se décompose en couches. La couche 1 est composée de contrôleurs frontaux, qui sont des automates programmables. Chacun d'entre eux est raccordé à plusieurs interfaces opérateur locales qui assurent le contrôle des équipements de l'usine, à proximité immédiate du procédé lors les opérations de maintenance. La plupart des contrôleurs sont raccordés à des systèmes de reconnaissance d'images sur PC, constituant un dispositif entièrement automatisé de contrôle et d'identification des pastilles, des crayons et des assemblages de combustible.



Le poste de contrôle central de l'usine MOX permet de diriger toutes les opérations de fabrication du combustible et d'en contrôler le bon déroulement.

Un système d'automatisation composé de trois couches et d'un poste de contrôle central

La couche 2 est destinée à la gestion et au stockage de données : elle utilise pour ce faire des serveurs hautes performances. Des postes de travail permettent aux opérateurs de surveiller le procédé et de modifier ses paramètres. Cette solution globale utilise un matériel Hewlett Packard (serveurs et postes d'affichage opérateur), tandis que le système d'exploitation est de type HP UNIX. Une base de données ORACLE, installée sur le système UNIX, assure les fonctions de gestion, de stockage et de récupération des données.

La couche 3 est constituée d'un ordinateur d'information. Il contient des archives de données de traçabilité, de qualité des produits, et des données d'exploitation de l'usine, en plus d'un système de comptabilité des matières nucléaires. Ce dernier permet d'établir des bilans selon des méthodes statistiques sans devoir arrêter l'installation. L'interface opérateur distante fournit des synoptiques, des fonctions de début de séquence, des alarmes, des messages et des diagnostics de défaillance du système. Ce poste de contrôle central, éloigné des équipements de production, permet de diriger toutes les opérations de routine. L'opérateur l'utilise pour lancer des ordres qui sont exécutés par les contrôleurs frontaux, et y mène des diagnostics de défaillance.

Les voies de transmission de données entre les couches sont des systèmes de bus Ethernet.

IAN MORTON, GEORGE BURROWS
BNFL
Engineering Ltd.

Le système utilise deux serveurs identiques. Le premier assure la surveillance et le contrôle actifs de l'installation, fournissant toutes les fonctions utilisateur requises. Le second est une unité de réserve « chaude », qui surveille l'état de l'autre serveur. En cas de défaillance du serveur actif, le second prend le contrôle du procédé de l'usine.

Deux serveurs pour assurer la surveillance et le contrôle de l'usine

Cette commutation se fait de façon semi-automatique, avec intervention de l'utilisateur. Un système de « mirroring » (inscription simultanée des données sur les deux disques) permet aux deux serveurs d'accéder à l'ensemble des données stockées dans la couche de gestion de données.

La formation des opérateurs et l'essai des logiciels du système de contrôle se font par le moyen d'un simulateur. Les opérations normales de l'usine et les éventuels scénarios de défaillance ont pu ainsi être simulés (voir encadré ci-dessous).

Le procédé de l'usine MOX de Sellafield nécessitait un haut degré d'automatisation, si bien que le système de contrôle a été conçu pour fournir à l'opérateur des outils parfaitement sûrs de fabrication et de contrôle à distance des pastilles, crayons et assemblages de combustible MOX. Une fonction entièrement intégrée de production, de contrôle et de suivi des lots au niveau de l'usine permet de coordonner en temps réel les ordres de fabrication.

BNFL a élaboré un cahier des charges garantissant une bonne homogénéité entre les divers équipements de manutention et de transformation. Pour y parvenir, la société a réalisé un outil de conception et de spécification qui a été utilisé pour définir la séquence logique des opérations de l'usine pilotées par les contrôleurs frontaux, les entrées/sorties et les dispositifs d'alarme et de messages. C'était la première fois qu'une telle procédure était employée dans un grand projet.

La conception du poste de contrôle central de l'usine MOX de Sellafield répond à des critères avancés d'ergonomie, et favorisera une exploitation sûre et efficace de l'usine. ■

LES APPORTS DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE

Fidèle à son image de pionnier, BNFL a commencé à étudier les applications de la réalité virtuelle dès le début des années 1990, en étroite collaboration avec le centre de recherche national en robotique avancée (dont une partie est par la suite devenue VR Solutions, branche de renommée mondiale de Virtual Presence Ltd.). L'un des premiers projets impliquant la réalité virtuelle a été de concevoir la nouvelle salle de commande de l'usine de fabrication du MOX, SMP (Sellafield Mox Plant).

Certains aspects de la conception, qui avaient jusqu'alors été difficiles à évaluer et à communiquer, ont pu être rapidement mis en évidence au sein de l'équipe dont les membres venaient d'horizons divers : architecture, conception, ingénierie, ergonomie et exploitation des centrales. Ainsi, le concept de réalité virtuelle a permis d'optimiser le processus ergonomique relatif à l'évaluation du champ de vision des opérateurs dans la salle de commande.

Concepteurs et ergonomistes considèrent un même problème selon des points de vue différents. Les concepteurs parviennent généralement à une solution viable assez rapidement, puis abordent les problèmes liés à l'exploitation. Inversement, les ergonomistes ont tendance à analyser la façon dont un système sera utilisé, puis à concevoir ce système de sorte qu'il satisfasse ses utilisateurs.

Grâce à la réalité virtuelle, les membres du groupe de travail chargé de la salle de commande de Sellafield (une équipe composée de concepteurs de BNFL, de représentants du groupe d'exploitation de SMP, ainsi que d'ergonomistes) ont pu être virtuellement placés dans la salle de commande afin de se rendre compte par eux-mêmes des problèmes d'ergonomie.

Les retombées positives du projet SMP étaient évidentes, et les concepteurs, ainsi que l'encadrement, ont été conquis par les technologies de la réalité virtuelle.

La première phase du projet étant maintenant achevée, et la salle de commande de SMP construite, BNFL est à nouveau rentrée en contact avec Virtual Presence afin de déterminer s'il était possible de tirer davantage profit de la réalité virtuelle. La première salle de commande virtuelle avait été modélisée par le personnel spécialisé de Virtual Presence sur un « supercalculateur » graphique. Toutefois, la puissance des ordinateurs augmentant de façon quasi exponentielle, il était évident que le concept de réalité virtuelle serait encore plus utile si la modélisation était faite en interne par le groupe BNFL chargé de l'ergonomie. Cela impliquait un transfert du modèle, de sorte qu'il puisse fonctionner sur un PC haut de gamme. Cette approche est aujourd'hui quasi reconnue comme étant l'approche *de facto* des projets de réalité virtuelle, mais cela était tout à fait inhabituel en 1995.



Placés dans une salle de contrôle virtuel, les opérateurs sont formés en toute sécurité à l'ensemble des actions qu'ils seront amenés à effectuer.

Le groupe ergonomie de BNFL, avec le soutien de Virtual Presence, a maintenant conçu une salle de commande virtuelle pour URENCO, usine d'enrichissement d'uranium située à Capenhurst (Royaume-Uni). Le même groupe a conçu une salle de commande et un centre de surveillance des incidents virtuels pour l'usine DRYPAC de Sellafield.

Grâce à l'augmentation de la puissance des ordinateurs, Virtual Presence et BNFL ont décidé en 1997 de développer un démonstrateur de formation, fondé sur la conception finale de la salle de commande, mais peuplée cette fois d'opérateurs et d'un chef d'équipe virtuels.

L'utilisation d'un modèle pour la formation se révèle très efficace. Celle-ci se décompose en deux cours. Le premier est un cours de présentation et de familiarisation. Il utilise le modèle de base en réalité virtuelle afin de présenter la salle de commande aux opérateurs. Le second est un cours détaillé, grâce auquel l'opérateur apprend pas à pas chacune des tâches qu'il sera amené à effectuer : il peut réellement interagir avec tous les moniteurs de visualisation, panneaux et enregistrements de la salle de commande virtuelle et expérimenter l'ensemble des actions à effectuer.

Le personnel virtuel se relaie aux mêmes moments que dans la réalité. Le journal d'enregistrement virtuel permet de conserver des données précises sur toutes les modifications de la même façon qu'en situation réelle. Dans la salle de commande virtuelle, les placards s'ouvrent et se ferment, les horloges fonctionnent, les téléphones peuvent mettre l'opérateur en relation avec ses collègues, et des ordinateurs portables ou des superviseurs peuvent être éventuellement consultés. Toutes les procédures virtuelles traitent, comme dans la réalité, des problèmes de vigilance et d'actions correctives.

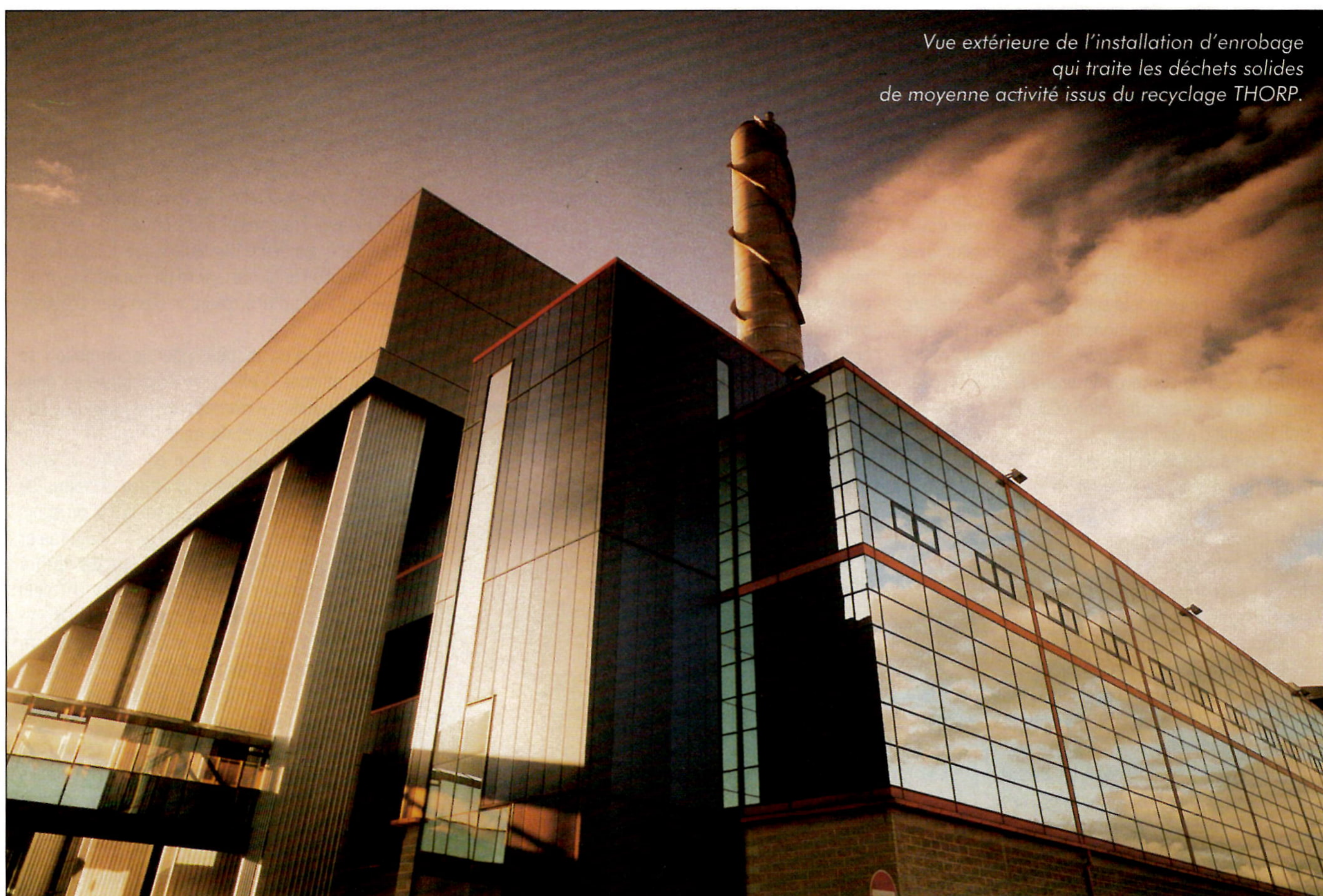
Et Mike Gavins, ingénieur principal chez Virtual Presence, responsable de la supervision de ce projet, de conclure : « *Nous avons exploité à fond les possibilités du logiciel de réalité virtuelle. BNFL voulait un niveau de détail toujours plus élevé et nous étions nous-mêmes étonnés par ce que l'on pouvait faire avec un PC. Le système final possède des textures d'un réalisme que je n'aurais pas cru possible.* »

DÉCHETS NUCLÉAIRES :

Une stratégie globale

Toutes les activités faisant appel à des matières radioactives génèrent des déchets. BNFL a mis en place une stratégie globale de gestion qui lui permet de traiter non seulement ses propres matières radioactives, mais aussi celles de différents clients internationaux.

GRAHAM FAIRHALL ET LINDSAY EDMISTON



Vue extérieure de l'installation d'enrobage qui traite les déchets solides de moyenne activité issus du recyclage THORP.

GRAHAM FAIRHALL et **LINDSAY EDMISTON** BNFL.

Sur son site de Sellafield, dans le nord-ouest de l'Angleterre, BNFL exploite deux installations commerciales de recyclage, ainsi que des installations associées de gestion des déchets. Le site est également équipé d'installations de fabrication de combustible et de production d'électricité. Récemment, BNFL a entrepris plusieurs projets de déconstruction sur le site. Ces activités ont généré la production de nombreux flux de déchets nucléaires, appartenant aux différentes catégories recensées au Royaume-Uni. Les déchets radioactifs britanniques sont classés en trois catégories(1) :

1. Les déchets de haute activité. Il s'agit de déchets thermogènes, dont la température peut augmenter de façon significative en raison de leur radioactivité ;
2. Les déchets de moyenne activité. Ce sont des déchets présentant une radioactivité supérieure aux niveaux fixés pour ceux de faible activité, mais ne générant pas une quantité de chaleur significative du fait de leur radioactivité ;
3. Les déchets de faible activité. Ces derniers ont une activité inférieure à 4 GBq/t dans le cas d'une activité alpha, ou 12 GBq/t dans le cas d'une activité bêta-gamma.

Au cours du siècle à venir, le recyclage des combustibles nucléaires générera de nouveaux déchets dans chacune de ces trois catégories : un défi majeur pour BNFL, avec la récupération et le traitement des déchets existants.

Avant 1980, BNFL a adopté une politique de stockage sur le site de Sellafield, tout en évitant d'exclure les différentes solutions de gestion. Les déchets étaient stockés dans des entrepôts, des silos, des cuves et des piscines, construits à cet effet. Dans de nombreux cas, des substances de nature différente ont été mélangées et stockées ensemble.

Le dépôt de déchets de faible activité BNFL à Drigg a été mis en service à la fin des années 1950. Il reçoit aujourd'hui les déchets des sites nucléaires de l'ensemble du Royaume-Uni, ainsi que ceux des hôpitaux et des universités britanniques. La

UNE GESTION EFFICACE

stratégie de gestion des déchets de faible activité a beaucoup évolué ces dernières années, s'orientant en particulier vers la réduction des volumes et la caractérisation des différentes formes. Les déchets de faible activité sont générés par diverses opérations effectuées sur le site et contiennent une proportion élevée de cellulose ou de plastiques. Ils étaient traditionnellement déversés dans des tranchées et progressivement recouverts de terre puis d'une chape d'argile imperméable. Depuis la fin des années 1980, ils sont stockés dans des conteneurs, et placés dans une voûte technique en béton, spécialement construite à cet effet.

En marge de l'amélioration des infrastructures du site, la forme des déchets a été étudiée afin de mettre au point des méthodes permettant de réduire leur volume et d'allonger la durée de vie de l'installation de Drigg. L'amélioration des procédures a permis de réduire les volumes à la source, et un compactage poussé a été adopté pour réduire de façon significative le volume produit. Les déchets compactés sont enrobés dans du ciment au sein de conteneurs ISO, avant d'être placés dans la voûte en béton. L'installation de compactage poussé, située à Sellafield, et l'installation d'enrobage, située à Drigg, sont entrées en service en 1994(2).

Dès le début des années 1980, BNFL a élaboré et mis en œuvre une stratégie complète de gestion des déchets. Elle prend en considération aussi bien ceux de haute et moyenne activité générés par le passé, que la production prévue pour l'avenir. Cette stratégie visait principalement à maximiser la sécurité, minimiser les coûts d'exploitation et de maintenance, minimiser les effluents, répondre aux exigences réglementaires, minimiser les volumes, conditionner les déchets de façon à répondre aux exigences réglementaires de stockage et de transport, et aussi à satisfaire aux futures exigences de stockage. Les études techniques approfondies menées par BNFL au début des années 1980 ont montré que le stockage sous une forme immobilisée permet de réduire le niveau de risque et les coûts d'exploitation et de maintenance, tout en abaissant les doses absorbées par les opérateurs(3). Depuis 1990(4), Sellafield vitrifie les déchets de haute activité dans son installation WVP *(Waste Vitrification Plant)*. Le procédé de vitrification de Sellafield comporte deux étapes : calcination de la solution hautement radioactive et vitrification. Il a été mis au point pour traiter les effluents issus du recyclage du combustible Magnox et du combustible de la filière à eau légère, dans le cadre d'un vaste programme de développement faisant appel à des installations d'essais en grandeur réelle. Les produits vitrifiés ainsi générés sont entreposés dans un local technique, dans l'attente de leur stockage définitif au Royaume-Uni ou de leur restitution aux clients étrangers.

Examinons maintenant la gestion des déchets de moyenne activité. La cimentation apparaît actuellement comme la meilleure solution pour l'enrobage. Elle a été retenue à l'issue d'un vaste programme de R&D (recherche et développement) portant sur différentes techniques d'enrobage. Chacune d'entre elles a systématiquement été évaluée selon différents critères, définis en collaboration avec l'agence britannique pour l'élimination des déchets nucléaires, UK Nirex Ltd. (Nirex).

Les programmes de recherche ont permis de définir les solutions de stockage les plus appropriées

Ce programme de R&D, que BNFL a lancé en 1982, vise à garantir l'immobilisation de tous les flux de déchets de moyenne activité générés à Sellafield afin de :

1. Obtenir un produit essentiellement monolithique pouvant être stocké pour une durée minimale de cinquante ans ;
2. Répondre aux exigences relatives au transport ;
3. Conserver un produit essentiellement monolithique sur le site de dépôt cinquante ans après le transport ;
4. Répondre aux futures exigences relatives au stockage définitif.

L'évaluation des propriétés du produit enrôbé faisait partie des éléments essentiels du programme, qui visait les objectifs suivants(5) :

1. identifier les solutions d'enrobage possibles ;
2. sélectionner la solution d'enrobage la mieux adaptée à chaque déchet de moyenne activité ;
3. obtenir des données permettant de concevoir des procédés, d'étayer les dossiers soumis aux organismes de réglementation et de fixer les limites applicables aux opérations de l'usine.

Parmi les enrobages évalués, on peut citer : le ciment (modifié ou non par des polymères), les polymères, le bitume, le verre, les métaux à bas point de fusion, et les céramiques. Le choix a été fait après une évaluation initiale de l'ensemble de ces matrices, d'après les résultats de l'étude pratique réalisée pour chaque flux de déchets de moyenne activité. Les propriétés de chaque matrice ont été évaluées notamment sur leurs performances physiques, chimiques, mécaniques et leur stabilité (thermique et au rayonnement).

BNFL a mis en œuvre sa stratégie avec succès, et plusieurs installations totalement opérationnelles sont actuellement en service (voir l'article sur l'immobilisation des déchets radioactifs sur le site British Nuclear Fuels de Sellafield).

Les déchets provenant du recyclage des combustibles d'un client donné ne sont généralement pas séparés, mais ajoutés à des déchets similaires issus des combustibles d'autres clients. Des systèmes d'affectation ont donc été mis au point afin d'attribuer des



Le dépôt de déchets de faible activité BNFL de Drigg. On peut observer les tranchées recouvertes et la voûte technique.



Les conteneurs ISO de déchets sont acheminés par camion au site de Drigg, où ils sont immédiatement comblés par du ciment.

déchets à chaque client de façon simple mais équitable. Cependant, seuls certains déchets seront renvoyés à l'étranger, d'autres étant substitués à ceux conservés au Royaume-Uni. Après avoir envisagé différentes solutions, BNFL a jugé que le potentiel de toxicité intégrée (PTI) était le meilleur moyen pour évaluer et quantifier l'équivalence des différents flux de déchets, pour leur restitution aux clients étrangers après recyclage (voir encadré ci-dessous).

BNFL et les autres producteurs britanniques de déchets radioactifs sont confrontés à un problème majeur : garantir que les colis de déchets qu'ils produisent répondent aux exigences réglementaires de stockage, avant de rechercher un emplacement susceptible de les recevoir(6). Créée au début des années 1980, l'agence Nirex est chargée de développer et, à terme, d'exploiter les futurs dépôts de déchets radioactifs du Royaume-Uni. Pour s'assurer de la compatibilité des déchets traités avec un stockage en profondeur, Nirex a élaboré ces dix dernières années plusieurs cahiers des charges relatifs à leur conditionnement. Ces spécifications ont été élaborées en collaboration avec les clients de l'agence. BNFL a élaboré des projets de conditionnement en étroite collaboration avec Nirex, qui propose à BNFL, comme aux autres producteurs de déchets, un conseil sur la validité des projets de conditionnement, et cela à tous les stades : depuis la conception du projet jusqu'à l'exploitation active des installations. Ces conseils portent sur l'évaluation de quinze aspects techniques de chaque conditionnement proposé : nature et forme des déchets, conception des conteneurs, comportement en cas d'accident, transport et sécurité...

Au travers de sa filiale nord-américaine BNFL Inc., BNFL met en œuvre une approche systématique pour deux de ses contrats actuels : celui pour les services de réhabilitation des déchets des cuves, TWRS (Tank Waste Remediation Services), à Hanford (Etat de Washington) ; et celui pour une installation de traitement des déchets mixtes, AMWTP (Advanced Mixte Waste Treatement Plant), dans l'Idaho.

Le projet TWRS se propose de traiter le liquide récupéré dans les cuves enterrées de Hanford, pour le transformer sous une forme se prêtant au stockage. Un schéma de principe relatif au traitement de ce type de flux de déchets a été élaboré à partir d'une caractérisation des déchets initiaux, et des contraintes liées à un stockage définitif. Les actinides et les produits de fission sont éliminés par ultrafiltration et par échange d'ions. Le flux de déchets faiblement radioactifs ainsi obtenu est ensuite vitrifié, et éliminé par enfouissement à faible profondeur. Les flux de déchets plus fortement radioactifs sont vitrifiés séparément, et seront transférés vers l'installation de stockage de National Yucca Mountain.

Le projet AMWTP a fait appel à une approche systématique pour identifier les technologies de récupération, de reconditionnement et d'incinération les mieux adaptées au traitement des déchets transuraniens (actuellement stockés en bassins dans l'Idaho). La solution retenue est de récupérer et d'incinérer les déchets combustibles d'une part et d'enrober les cendres dans du ciment d'autre part. Les déchets non combustibles subiront un macro-enrobage avant élimination.

BNFL possède aujourd'hui une solide expérience dans la gestion des déchets. Ses nombreux travaux de recherche lui permettent d'envisager sereinement le traitement des déchets nucléaires futurs, quel que soit leur niveau d'activité. ■

LE PRINCIPE DU POTENTIEL DE TOXICITÉ INTÉGRÉE (PTI)

La plupart des pays qui mènent des programmes sur l'énergie nucléaire considèrent que les déchets radioactifs, après un conditionnement adéquat, doivent être consignés dans un dépôt géologique profond pour un stockage définitif. Dans ce contexte, la première préoccupation est l'éventuel retour de la radioactivité dans la biosphère à long terme, par l'intermédiaire de l'eau potable notamment. Le PTI permet de quantifier, à moyen et à long terme, la nocivité potentielle liée à la radioactivité des déchets.

Le potentiel de toxicité d'une quantité définie d'un radionucléide est défini par le volume d'eau dans lequel cet élément radioactif doit être dispersé, pour qu'un homme « moyen », dont la totalité d'eau de boisson proviendrait de la source contaminée, absorbe la dose limite annuelle recommandée de 1mSv. Selon les estimations de la Commission internationale de protection radiologique, la CRP (International Commission on Radiological Protection), un homme « moyen » consomme 0,712 m^3 d'eau par an. La CRP a donc pu en déduire les limites annuelles d'incorporation, ou ALI (Annual Limit of Intake), correspondant à une dose de 1mSv pour chaque radionucléide. Le TPI s'exprime par la formule :

Potentiel de toxicité (m^3 d'eau) = activité du radionucléide (Bq) x 0,712 (m^3 eau/an) / ALI (Bq/an)

Le potentiel de toxicité de tout déchet peut être calculé en faisant la somme des toxicités des radionucléides qu'il contient. Il correspond au volume d'eau dans lequel il faudrait totalement disperser ce déchet pour que cette eau soit encore jugée consommable en toute sécurité. Par exemple, un déchet hautement toxique nécessiterait une dilution importante. En intégrant le potentiel de toxicité sur une période appropriée, on peut déduire une valeur qui pondère les radionucléides à demi-vie longue, moyenne et courte.

En matière de calcul de l'équivalence des déchets, le PTI présente les avantages suivants :

1. Il est simple, facile à comprendre et à calculer.
2. Il tient compte de l'histoire des différents combustibles.
3. Il repose sur la radiotoxicité, et représente le potentiel de nocivité du déchet.
4. Il pondère les radionucléides à demi-vie courte, moyenne et longue. Ces derniers, généralement les émetteurs alpha, ont une activité spécifique souvent faible.
5. Il ne dépend pas d'un site d'élimination de déchets particulier.
6. Il permet la substitution de déchets appartenant à différentes catégories. Par exemple, celle de déchets de haute activité à des déchets de moyenne activité.

(1) R.W. Asquith et G.A. Fairhall, *The Evolution of Waste Management Processes and Technologies in BNFL. Global 97*, Yokohama, 1997.
(2) I.G. Fearnley, *System Approach for the Management of Radioactive Waste*, BNFL.
(3) G.A. Fairhall, *Effect of Operational Variables on the Product properties of Encapsulated Intermediate Level Wastes. Conference on Radioactive Waste Management 2*, BNES, Brighton, 1989.
(4) G.A. Fairhall et C.R. Scales, *Vitrification Development for High Active Waste at BNFL Sellafield. Conference on Materials and Nuclear Power, Euromat 96*, Bournemouth, 996.
(5) G.A. Fairhall, G.H. Jonsson et K.J. Newland, *Development of Waste Cementation within BNFL. Euromat 96*, Bournemouth, 1996.
(6) G.A. Fairhall et J.D. Palmer, *The Immobilisation and Packing of Radioactive Wastes for Deep Geological Disposal in the UK. An integrated Approach*, WM97, Tuscon, 1997.

Des compétences multiples pour le démantèlement

BNFL possède une solide expérience de la déconstruction et du démantèlement des sites nucléaires, acquise lors d'opérations menées sur ses propres sites. Son très large savoir-faire est à disposition de toutes les industries qui manipulent des produits radioactifs.

LINDSAY EDMISTON, DAVID GAMBERINI

Le démantèlement et la déconstruction des installations nucléaires font partie intégrante des activités de BNFL depuis le milieu des années 1950. L'un des objectifs initiaux était de préparer l'espace nécessaire pour accueillir de nouveaux sites. Depuis le démarrage du premier programme majeur de démantèlement/déconstruction, au début des années 1980, l'expérience et le savoir-faire de BNFL se sont rapidement accrus, permettant à la société de prendre place dans un marché d'envergure mondiale. De nombreuses opérations ont été depuis menées avec succès. Après le regroupement de BNFL et de la société Magnox Electric, en 1998, BNFL a ajouté le démantèlement de réacteurs à son savoir-faire, qui s'étend désormais sur l'ensemble des installations impliquées dans le cycle du combustible nucléaire(1).

Les projets entrepris par BNFL font appel à une vaste gamme de technologies et de techniques, choisies selon les objectifs à atteindre propres à chaque opération. Un programme important de recherche et développement (R&D), mis sur pied en 1989 dans le cadre des projets de démantèlement et de déconstruction à Sellafield, a permis de concevoir des équipements et des techniques aujourd'hui utilisés de façon concluante pour de nombreux projets. Parmi les développements et les innovations découlant directement des travaux effectués à Sellafield, on peut citer à titre d'exemple l'usine de coprécipitation (destinée au plutonium), l'usine de granulation DGPP (Dry Granulation Production Plant) (également destinée au plutonium), et l'installation bêta-gamma pilote B205 (destinée au combustible usé).

Les programmes de R&D visent essentiellement à réduire les coûts et les incertitudes associés aux démantèlements et déconstructions actuels et futurs. Ils ont trois principaux objectifs(2) :

1. Améliorer les méthodes d'estimation des coûts ;
2. Développer l'évaluation des stratégies et méthodes ;
3. Développer les techniques, les procédés, les outils et les équipements, dans le but d'améliorer l'efficacité de la déconstruction/démantèlement.

Les axes du programme peuvent être subdivisés en un certain nombre de catégories : décontamination, techniques de découpage, et instrumentation. Le recours à la décontamination constitue un aspect important des opérations de BNFL (voir l'encadré, page 40), car il facilite la maintenance manuelle, et permet donc de réduire la dose absorbée par l'opérateur. Les coûts de main-d'œuvre sont réduits.



Lors de la déconstruction des anciennes centrales du site de Windscale, les équipes spécialisées ont retiré les filtres contenus dans les cheminées lors du démontage de celles-ci. Un exemple de savoir-faire de BNFL dans la déconstruction de sites.

La décontamination réduit les coûts du démantèlement et le rend plus sûr

En outre, une installation totalement décontaminée est beaucoup moins coûteuse à démanteler, étant donné la réduction du volume de matériel, de matériaux irradiant, et la diminution de dose associée. La pratique courante, précédant et accompagnant le démantèlement, consiste à analyser les boîtes à gants, les fûts... pour détecter la présence de plutonium. Ceci permet de mettre en œuvre des procédures adéquates et d'éviter toute situation critique pendant le démantèlement. L'analyse facilite également l'identification des éléments à fort rayonnement, qui seront ainsi enlevés et mis en sécurité plus rapidement.

BNFL a développé le système de contrôle *in situ* du plutonium DISPIMS (Decommissioning In Situ Plutonium Inventory Monitoring System) pour effectuer ces mesures. Des détecteurs sont disposés autour de l'élément examiné afin de compter les neutrons émis en fonction du temps. Ces mesures sont ensuite corrélées à la masse de plutonium. Le développement de ce système a été poursuivi dans le but d'adapter son usage, selon le projet, au contrôle de conteneurs ou à celui de tout autre élément d'une installation. L'analyse

LINDSAY EDMISTON, DAVID GAMBERINI, BNFL.

des éléments contaminés par du plutonium avant le conditionnement des déchets est considérée nécessaire en raison des risques de criticité. Elle permet ainsi d'optimiser le remplissage des conteneurs, ce qui amène à une réduction des coûts de manutention et de stockage des déchets(2).

Le besoin d'identification rigoureuse des points chauds (de plutonium, de résidus de combustible ou de produits de fission), croît avec les efforts poursuivis par BNFL, tout au long du développement de son programme de démantèlement/déconstruction, pour réduire l'exposition des opérateurs. L'expérience acquise dans divers projets a révélé qu'il est essentiel de localiser le plus tôt possible les zones à fort rayonnement, de façon à pouvoir les isoler, les déplacer ou les décontaminer. Cette mesure de sécurité permet la poursuite des opérations dans un environnement moins rayonnant. Des systèmes d'imagerie développés par BNFL Instruments Ltd. ont été utilisés de façon très concluante dans des environnements alpha, bêta et gamma.

Examinons maintenant les techniques de découpage mises au point par BNFL pour la déconstruction des installations nucléaires. Un certain nombre de projets

LES TECHNOLOGIES DE DÉCONTAMINATION

BNFL a déployé plusieurs technologies de décontamination sur son site de Sellafield. En voici quelques exemples.

Un procédé de grenaillage humide pour la décontamination des conteneurs de produits vitrifiés hautement radioactifs est en cours de mise en place. Ce procédé utilise une suspension abrasive, mélangée avec de l'air comprimé dans un pistolet haute pression. La suspension est composée d'environ 10 % d'abrasif dans de l'eau. Elle est projetée à une pression de 2,7 bars, à raison de 50 l/mn. Cette technique permet de nettoyer les surfaces en acier inoxydable fortement contaminées à des vitesses relativement élevées. De nombreux milieux de grenaillage différents peuvent être employés : poudre d'alumine rose, billes de céramique, grenaille d'acier inoxydable...

Des techniques de décontamination chimique novatrices ont également été récemment utilisées avec succès, dans le cadre d'opérations de maintenance. Par exemple, un procédé à base d'acide chlorhydrique a permis de décontaminer une canalisation en Inox hautement radioactive. Parmi les avantages de cette technique, on peut noter qu'elle s'utilise à température ambiante, et que ses propriétés oxydantes peuvent être modifiées en fonction des caractéristiques des substrats contaminés.

Les jets d'eau à très haute pression (jusqu'à plus de 4 000 bars) sont couramment employés pour nettoyer et décontaminer les surfaces métalliques. Très précis (leur diamètre est compris entre 0,05 et 0,50 mm de diamètre), ils peuvent en outre être entraînés dans un mouvement circulaire par un moteur à des vitesses supérieures à 3 000 tr/mn. Les jets d'eau sont utilisés dans un large éventail d'opérations de décontamination, telles que le nettoyage du châssis des bennes de transport.

Complémentaires, ces techniques peuvent être combinées pour personnaliser la solution de décontamination en fonction des besoins spécifiques du client. Pour chaque projet de déconstruction, un outil informatique puissant développé par BNFL oriente le choix vers la solution la mieux adaptée et la plus économique.

BNFL a mis en place un vaste programme de recherche et développement qui vise à mettre au point des technologies innovantes susceptibles d'apporter des améliorations par rapport aux technologies de base existantes, en termes de sécurité, de réduction des déchets secondaires, de diminution des temps d'exposition et de minimisation de l'impact environnemental.

De nombreux exemples illustrent le développement de ces technologies innovantes.

La décontamination biologique a été développée conjointement avec des universités et d'autres organismes de recherche, avec lesquels ont été signées des conventions internationales. Cette démarche a permis à BNFL de bénéficier de leur expérience et de leur excellence scientifique, et ainsi de réduire le coût et la durée du développement. Le procédé de décontamination biologique comporte quatre étapes. La zone à décontaminer est tout d'abord clôturée à l'aide d'un système de confinement modulaire. L'humidité relative est portée à 90 %, et la température à 25-35 °C. On applique alors, sous forme de gel, une bactérie qui oxyde le soufre. La troisième étape consiste simplement à attendre 6 à 12 mois, durant lesquels la bactérie produit de l'acide sulfurique. L'acide se dégage au niveau de micro-sites d'adhérence qui assurent la cohésion du béton, et provoque une dégradation progressive de sa surface. La partie dégradée est alors éliminée, entraînant la contamination, par une simple aspiration. L'ensemble du processus peut être mis en œuvre à distance. Comparée à la technologie de base de décontamination du béton, la décontamination biologique présente l'avantage de ne nécessiter qu'une surveillance minime de l'opérateur, dont le temps d'exposition est ainsi réduit, et de ne générer quasiment aucun flux de déchets secondaire. Elle est en outre silencieuse et ne génère pas de poussière. La simplicité et le faible coût de ce procédé permettent de programmer son déploiement pendant les périodes d'entretien et de maintenance qui suivent l'arrêt des usines nucléaires, avant le début du déclassement des structures.



Les procédés biologiques ont été employés avec succès pour la décontamination du site de Capenhurst.

BNFL poursuit également le développement de ses techniques de décontamination chimique. Un large éventail de substrats métalliques ont ainsi été décontaminés, à des degrés divers, par complexation et élimination des contaminants de surface au moyen de réactifs organiques, ou par élimination des couches d'oxydes à l'aide d'acides forts minéraux. Les travaux récents portent sur des réactifs très agressifs utilisables à température ambiante et sur des techniques de traitement de déchets permettant de réutiliser en continu le réactif de décontamination. Des systèmes de filtres à haut débit et haut rendement, résistant à la corrosion, ont été mis au point. Ces filtres sont utilisés en association avec des matrices échangeuse d'ions. Ainsi, le liquide peut être réutilisé. Les radionucléides et les ions métalliques peuvent être évacués ultérieurement. A l'heure actuelle, BNFL exploite au Royaume-Uni deux usines pilotes pour améliorer les procédés de décontamination chimique.

Enfin, BNFL développe de nombreuses méthodes de décontamination mécanique : jet d'eau à très haute pression, grenaillage, écroutage, jet de neige carbonique, raclage, aspiration... Les études actuelles portent en particulier sur l'écroutage du béton par laser (c'est-à-dire l'élimination au laser de la surface), et par hyperfréquence (absorption d'énergie hyperfréquence causant la décohésion du béton par relâchement des contraintes internes de la matrice).

BNFL possède d'ores et déjà une expérience et un savoir-faire considérables en matière de décontamination. Le vaste programme de recherche et développement dont nous avons rapidement examiné quelques points lui permettra de conserver sa position de premier fournisseur mondial de solutions de décontamination et de déconstruction.

Ian Mason

actuels ont recours au découpage par jet de plasma. Le chalumeau à arc de plasma est actionné dans une enceinte de fumée. Celle-ci est équipée de son propre système d'extraction d'oxygène. Les fumées issues du découpage sont extraites de l'enceinte au travers d'un filtre qui les purifie. L'expérience a démontré l'efficacité de l'arc de plasma, dont l'usage permet d'optimiser le remplissage des conteneurs. La légèreté de l'appareil facilite sa manipulation par les opérateurs.

Une vaste gamme de techniques de découpage améliore la protection des opérateurs

Une gamme d'outils pour le sertissage et le découpage a également été développée. Elle comprend un modèle portatif qui comprime hydrauliquement et coupe des tuyauteries en acier inoxydable, dont le diamètre peut atteindre 2,5 cm. La coupure est propre et n'expose pas les surfaces internes de la tuyauterie. Ce système est utilisé pour sceller et couper des tuyauteries contaminées de l'intérieur, sans que la radioactivité ne puisse se répandre.

Des techniques d'injection de mousse ont été utilisées avec succès pour le découpage de conduits métalliques de gros diamètre. Les tronçons de tuyauterie sont remplis de mousse durcissante, avant la découpe. Cette technique permet de limiter la propagation de la contamination.

Notons que, grâce à ces deux dernières techniques, les opérateurs sont soumis à des exigences moins contraignantes en matière de vêtements et de protections respiratoires.

Depuis le milieu des années 1980, le nombre de projets de déconstruction et de démantèlement n'a cessé de croître. BNFL a participé à plus de quarante d'entre eux dans le monde entier.

Le programme de démantèlement des sites propres à BNFL doit se poursuivre au-delà de l'an 2100 ! Parmi les projets inclus dans ce programme, on trouve notamment, au Royaume-Uni, l'usine de diffusion gazeuse pour l'enrichissement de l'uranium de Capenhurst, dans le Cheshire, les installations de production de l'hexafluorure d'uranium UF_6 à Springfield, dans le Lancashire, les projets de démantèlement des réacteurs Magnox à Berkeley, Trawsfynydd et Hunterston, ou dix-huit projets importants à Sellafield, dans le Cumbria, couvrant les bassins de stockage, les installations de recyclage, les chaînes de purification du plutonium, les installations de traitement du solvant, le réacteurs de Windscale, ainsi que plusieurs installations de R&D.

En plus des projets de démantèlement et de déconstruction associés à ses propres sites, BNFL a réalisé avec succès le démantèlement du réacteur URR (Universities Research Reactor) à Risley, dans le Cheshire au Royaume-Uni. Cette opération a été terminée en 1995 et, depuis, le site a été transformé en entrepôt de stockage pour une grande société informatique. Grâce à sa filiale BNFL Inc., le savoir-faire et l'expérience que BNFL a acquis lors des opérations menées au Royaume-Uni peuvent être mis à disposition des clients ayant des projets similaires.



Le démantèlement d'une centrale nécessite de déposer l'ensemble de ses équipements. Ici, des générateurs de vapeur issus de la centrale de Berkeley.

Des contrats de démantèlement et de déconstruction divers dans le monde entier

BNFL Inc. a obtenu un certain nombre de contrats, parmi lesquels, aux Etats-Unis, celui de l'unité de traitement de déchets TWRS (Tank Waste Remediation Services) à Hanford (Etat de Washington), celui de l'usine AMWTP (Advanced Mixed Waste Treatment Plant) dans l'Idaho (voir à ce sujet l'article sur la stratégie de gestion des déchets), ou celui du parc technologique de Oak Ridge, ETTP (East Tennessee Technology Park).

Sur ce dernier site, BNFL Inc. et ses partenaires sont chargés de la décontamination et du démantèlement ou de la déconstruction de trois grandes usines de diffusion gazeuse. La technologie est celle qui avait été développée pour l'usine de diffusion de Capenhurst. Son principe repose sur la fusion des métaux : le métal contaminé provenant des installations de traitement est envoyé dans un four de fusion. Les résidus contaminés sont retirés et éliminés. Le métal propre peut alors être recyclé. Le projet ETTP permettra le recyclage de milliers de tonnes de métal propre, et la réutilisation industrielle des locaux[3].

Les technologies, procédés et initiatives développés par BNFL, et appliqués de façon concluante dans tous les domaines du déclassement pour le cycle du combustible nucléaire, sont en évolution constante, et ne cessent d'être mis à niveau. Les développements technologiques que BNFL a rendus possibles au Royaume-Uni sont maintenant utilisés sur des sites de clients situés dans le monde entier, et tout particulièrement aux Etats-Unis. ■

---

(1) A.C. Prescott et A.S.D. Willis, *Decommissioning Experience at BNFL*, 1999.
(2) D.A. Gamberini, *An Overview of Decommissioning and Decontamination Technologies utilised at BNFL*, Sellafield, 1997.
(3) D. Clemments, *Innovative Integration of People and Technology on a Major D&D Project*, WM99, 1999.

Préparer les déchets pour le stockage

Dans le souci de satisfaire aux exigences de stockage, BNFL a développé des techniques de conditionnement adaptées à chaque type de déchet. Des travaux de recherche permettent de proposer des méthodes de traitement pour tous les types d'installation.

ED BUTCHER, GRAHAM JOHNSON

Exploité depuis plusieurs années, le site BNFL de Sellafield (Royaume-Uni) génère de nombreux flux de déchets radioactifs qui doivent être éliminés par des voies adaptées. Jusqu'au début des années 1980, ces matières étaient stockées sans conditionnement préalable dans divers bassins, cuves, silos et entrepôts de surface du site pendant la décroissance de leur niveau d'activité. A cette époque, BNFL a entrepris une série d'études techniques détaillées qui lui ont permis de conclure que l'enrobage de ces matières présentait des avantages majeurs en termes de baisse des niveaux de risque généraux associés au stockage, de réduction de la dose d'irradiation des opérateurs et d'économies sur toute la durée de vie des installations. Ainsi, des déchets de tous niveaux d'activité (faible, moyenne et haute) ont été conditionnés pour répondre aux futurs besoins d'élimination.

Pour définir la méthode optimale de traitement de chaque type de flux de déchets, un vaste programme de recherche et développement a été mis en œuvre sur diverses solutions d'enrobage : ciment minéral, bitume, polymères, verre, ciments modifiés par des polymères, céramiques et métaux à bas point de fusion. BNFL a ainsi conclu que le ciment minéral était la meilleure solution disponible pour le traitement des déchets de moyenne activité, tandis que la vitrification constituait l'approche la plus adaptée aux déchets de haute activité.

Une trentaine de catégories de matériaux sont utilisées pour l'enrobage des déchets

Les déchets de moyenne activité constituent le flux de matière le plus complexe. Les caractéristiques radiologiques, physiques et chimiques des déchets produits à Sellafield sont très diverses. Plus de trente catégories de matériaux sont recensées. Elles peuvent être subdivisées en six grands groupes (tableau ci-contre). Les ciments utilisés dans le processus de traitement doivent donc être suffisamment polyvalents pour que chaque flux de déchets puisse être traité de manière à obtenir une forme adaptée au stockage à long terme. Les matières traitées doivent en outre répondre aux critères techniques de compatibilité avec le centre de stockage de déchets de moyenne activité.

Pour satisfaire à ces critères, BNFL a réalisé d'importants travaux de recherche, évaluant les caractéristiques physiques, chimiques, thermiques, mécaniques, et de lixiviation des formes de déchets associées à chaque type de flux.

A chaque flux de déchets son installation de traitement et d'enrobage

Ces informations ont été utilisées pour élaborer une base de données complète sur les interactions entre le ciment et les matières traitées, afin d'évaluer et de prévoir de façon précise le comportement futur des différentes formes de déchets. Ces données ont ensuite été employées pour mettre au point des systèmes de sécurité devant accompagner le stockage, et répondre aux exigences réglementaires de NIREX, l'organisme chargé du dépôt de déchets de moyenne activité au Royaume-Uni.

Pour traiter les différents flux de moyenne activité, BNFL a conçu et construit quatre installations à Sellafield. Une installation supplémentaire est en cours de construction (tableau page 44). Elles utilisent toutes des mélanges de ciment OPC (Ordinary Portland Cement) et de scories BFS (Blast Furnace Slag) ou de cendres PFA (Pulverised Fuel Ash). Les ciments sont mélangés de manière à ce que chaque installation puisse produire des formes de déchets stables à long terme, aussi concentrées que possible, afin de minimiser le volume final à éliminer.

Deux types de procédés de cimentation sont utilisés à Sellafield. Le premier consiste à enrober directement les déchets dans un ciment, préparé hors du conteneur, qui vient remplir les interstices existants entre les différents composants. La composition des matières à enrober est variable. Celles-ci peuvent contenir des éléments de petite taille, par exemple les gaines de combustible provenant des opérations de recyclage, auquel cas elles seront traitées soit dans l'usine MEP (Magnox Encapsulation Plant), soit dans l'usine WEP (Waste Encapsulation Plant). Les matières à enrober peuvent également contenir des éléments plus volumineux, tels que des palets supercompactés contenant des matières contaminées par le plutonium. Dans ce cas, elles sont dirigées vers le com-

Catégories de déchets	Flux de déchets types
Gaines et résidus de dissolution	Magnox, aluminium, gaines de combustibles en acier inoxydable et zircaloy, tourteau de centrifugation
Composants de démontage des réacteurs	Acier inoxydable, manchons en graphite
Boues	Gaines de combustibles corrodées, boues des bassins à combustibles
Traitement des effluents	$BaCO_3$, boues, floculats, résines échangeuses d'ions naturelles, zéolites synthétiques
Technologiques (haute activité bêta/gamma, faible activité alpha)	Filtres, solides divers, déchets combustibles
Transuraniens (TRU)	Solides divers, déchets combustibles, floculats, cendres d'incinération

ED BUTCHER
BNFL Inc.
GRAHAM JOHNSON
BNFL Sellafield.



Dans l'atelier d'enrobage, les déchets sont enrobés de ciment dans leurs conteneurs. Il s'agit en grande partie de déchets de moyenne activité en provenance de l'usine Thorp.

plexe de traitement WTC (Waste Treatment Complex).

Le second type de procédé consiste à effectuer directement le mélange dans les fûts. On l'utilise dans l'installation d'enrobage WEP pour traiter les suspensions de déchets, ainsi que dans l'installation d'enrobage et de conditionnement des déchets WPEP (Waste Packaging and Encapsulation Plant) pour les floculats ferreux provenant de l'installation d'élimination des actinides EARP (Enhanced Actinide Removal Plant). Le ciment est préparé dans le fût contenant les déchets à traiter. On le mélange de manière à obtenir une forme finale de déchets homogène. La palette servant au mélange est abandonnée dans le fût afin de minimiser les risques de contamination externe.

La cimentation est également utilisée pour enrober les déchets de faible activité destinés au site britannique de stockage, situé à Drigg, près de Sellafield. On traite ainsi essentiellement les vêtements de protection, les films plastiques, les matériaux d'emballage, et les déchets métalliques. Dans certains cas, les matières sont placées dans des fûts de 200 litres, qui sont supercompactés sur le site de Sellafield puis évacuées vers Drigg dans des conteneurs de transport de type « Isofreight ». Les interstices contenus dans les fûts sont comblés par du ciment, et les conteneurs sont rangés dans la voûte technique de Drigg.

Parallèlement aux travaux sur les déchets de moyenne activité, un projet similaire visant à déterminer la méthode la plus adaptée au traitement des déchets de haute activité a été mis en place. Plusieurs solutions ont été comparées, parmi lesquelles les calcinâts, le Synroc, les céramiques et le verre.

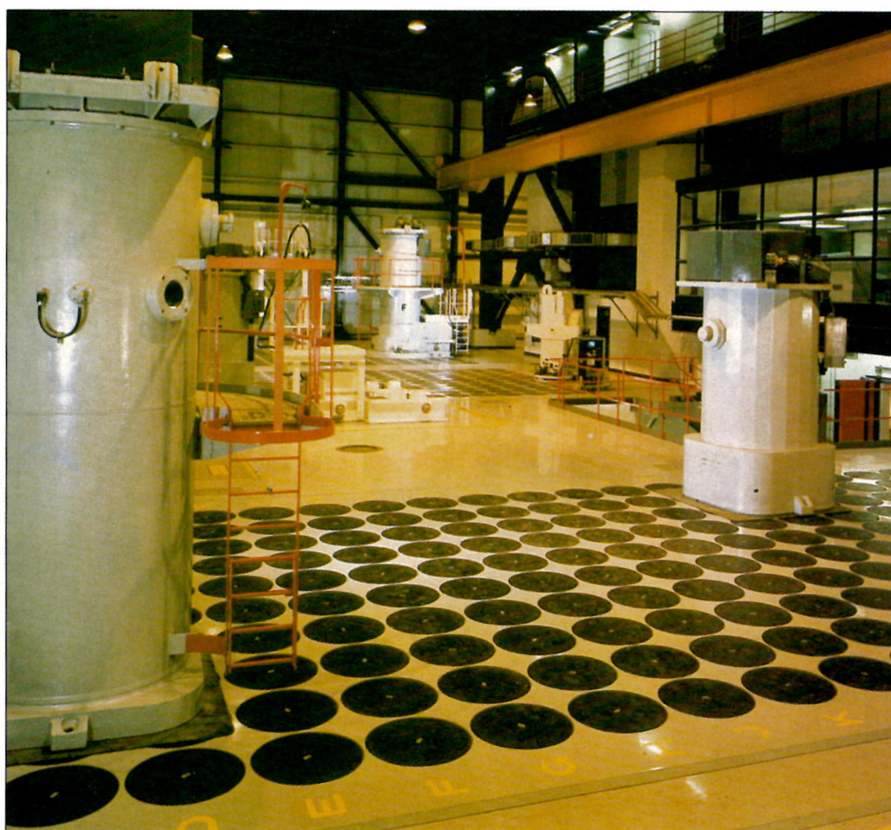
Un procédé français pour l'usine de vitrification des déchets

Compte tenu de la durabilité des différentes formes de déchets, et des critères d'exploitation de l'installation, il a été a conclu que le verre est l'option la plus adaptée. En outre, la vitrification va dans le sens des pratiques internationales actuelles de traitement des déchets de haute activité.

L'approche adoptée pour l'usine de vitrification des déchets WVP (Waste Vitrification Plant) repose sur le procédé français AVM/AVH. Celui-ci se compose de deux opérations distinctes : une calcination des déchets, puis une vitrification.

L'étape initiale de calcination est relativement simple. Il s'agit d'introduire une solution de nitrate métallique hautement radioactive dans un tube chaud en rotation. Il s'ensuit une évaporation et une dénitration partielle des déchets qui amènent à la formation d'un calcinât réactif et friable. Du sucre et du lithium sont ajoutés aux déchets de haute activité dans le four de calcination. Le sucre assure une réduction de la volatilité du nitrate libre et du ruthénium, alors que le lithium forme des complexes avec le fer et l'aluminium présents dans les déchets.

Ces derniers doivent être contrôlés car ils sont susceptibles de générer des composés réfractaires néfastes au processus de vitrification. Le calcinât est ensuite placé dans le four de fusion en présence de verre fritté. La charge finale en déchet est d'environ 25 %. L'alimentation du four et la fusion des déchets et du verre fritté nécessitent environ huit heures. La matière vitrifiée est ensuite déchargée en attente dans des conteneurs pouvant recevoir 400 kg de matière. Chacun est rempli en deux coulées. On laisse refroidir les conteneurs avant de les sceller et de les





Le local technique d'entreposage des déchets vitrifiés accueille des conteneurs en Inox. Ils sont placés dans un puits et extraits à l'aide de manipulateurs.

décontaminer. Ils sont ensuite transférés vers l'entrepôt de l'installation de vitrification. Les conteneurs y sont refroidis par un flux d'air naturel qui permet d'éviter un phénomène d'accumulation de chaleur. Les produits vitrifiés seront stockés pour une durée maximale de cinquante ans. Ils sont ensuite soit définitivement stockés au Royaume-Uni, soit restitués aux clients étrangers.

Installation	Date de mise en exploitation	Flux de déchets
Installation d'enrobage de Magnox (MEP)	1990	Gaines Magnox
Installation d'enrobage des déchets (WEP)	1994	Déchets THORP, solides/boues
Installation d'enrobage et de conditionnement des déchets (WPEP)	1994	Floculats, boues
Installation de traitement des déchets (WTC)	1996	Matières contaminées par le plutonium (TRU)
Installation d'enrobage de caissons (BEP)	2004	Déchets solides repris au dépôt

BNFL a acquis une grande expérience en matière de cimentation et de vitrification lors du traitement de ses propres déchets. Une base technique solide a été ainsi établie. Elle permet de venir en aide aux autres sociétés du groupe BNFL aux Etats-Unis, notamment BNFL Engineering Limited (BEL) et BNFL Inc., qui procèdent au traitement de déchets à l'extérieur du Royaume-Uni. On peut citer par exemple le travail de recherche et de développement, effectué par le groupe de cimentation et de caractérisation à Sellafield, contribuant au succès du projet de traitement des déchets mélangés AMWTP (Advanced Mixed Waste Treatment Project), mené par le laboratoire INEEL (Idaho National Engineering and Environmental Laboratory). Les matières concernées par cette étude sont les cendres d'incinération qui proviennent du traitement thermique, soit d'anciens déchets transuraniens (TRU), soit de déchets de faible activité, qui ont été stockés sur le site d'Idaho. Le travail de recherche en cours doit déterminer la technique de mélange optimale du flux de déchets ; définir la matrice cimentaire idéale permettant d'obtenir la charge de déchets maximale ; et permettre de s'assurer que la forme finale des déchets répond aux exigences de l'installation pilote chargée de l'isolement des déchets, WIPP (Waste Isolation Pilot Plant).

Expérience et recherche de répondre aux besoins nouveaux de traitement

Les équipes des groupes de cimentation et de vitrification de Sellafield ont été mises à disposition des filiales BNFL afin de les aider à évaluer les méthodes possibles pour le traitement des déchets en provenance des réservoirs de stockage du site de Hanford (Etat de Washington). Elles participent également au développement et aux tests des grands fours de fusion, utilisés pour produire des déchets vitrifiés.

BNFL possède désormais une vaste expérience en matière de développement de technologies, de traitement et d'élimination des déchets issus des sites nucléaires et des installations de recyclage. Ces technologies sont adaptées à un large éventail de déchets, pouvant présenter des niveaux de radioactivité et des caractéristiques physiques ou chimiques très variables. Grâce à cette expérience, alliée à une bonne connaissance pratique de la conception, de l'exploitation, du support et de la maintenance des installations, BNFL est en mesure de développer des solutions pratiques pour le traitement des déchets actuels et futurs, devant être éliminés aux niveaux national et international. ■



Le Pacific Swan est l'un des navires spécialement conçus pour le transport des matières radioactives : double système de propulsion ; espaces cargo séparés avec protection radiologique ; redondance des systèmes de navigation, de lutte incendie, des systèmes électriques et de communications ; double coque avec renforcement anticollision ; double structure de fond. De plus, ils sont armés par un équipage d'officiers et de marins britanniques.

Des instruments pour détecter la radioactivité

Depuis près d'un demi-siècle, BNFL développe des instruments de mesure sophistiqués pour caractériser tout objet irradiant. Ils sont aujourd'hui exploités à chaque étape du cycle du combustible. Certains d'entre eux sont manipulables à distance.

N.A. TROUGHTON, J.C.B. SIMPSON, R.D. GUNN, G. MOTTERSHEAD



Le spectromètre gamma RadScan®, dont on voit ici la tête de détection, est piloté à partir d'un poste de contrôle sur lequel les opérateurs peuvent effectuer des analyses.

Les instruments destinés aux mesures de radioactivité (ou instruments radiométriques) ont fait leur apparition dans les installations du complexe nucléaire de Sellafield en 1953. Leur usage avait pour objectif d'éviter les prélèvements d'échantillons et les analyses radiochimiques longs et difficiles. Lors des décennies suivantes, un programme de développement radiométrique a rendu possible la mise au point de différentes techniques de mesure, destinées à être appliquées à l'ensemble des étapes du cycle de combustible. Avec la création de BNFL Instruments, en 1995, l'industrie nucléaire mondiale s'est vu proposer tout un éventail de produits et de services utilisant ces techniques. Des collaborations avec les universités et les laboratoires nationaux d'Europe et des Etats-Unis ont permis à la société de développer de nouvelles solutions.

BNFL Instruments est aujourd'hui capable de répondre aux besoins croissants de sa clientèle tout en respectant les exigences des instances réglementaires. Les systèmes fournis à la société mère et, plus récemment, à nos clients internationaux contribuent, avec une remarquable efficacité, au fonctionnement sûr et fiable de diverses installations de recyclage, de gestion des déchets, de manutention des combustibles usés, et de déconstruction. La déconstruction des installations nucléaires obsolètes est une entreprise particulièrement complexe, souvent longue et coûteuse. En raison de son important passé nucléaire, le Royaume-Uni compte de nombreuses installations obsolètes qui doivent être, sont, ou ont été déclassées. L'usine de recyclage de Sellafield, dans le nord-ouest de l'Angleterre, relève de nombreux défis lancés par cette conjoncture, et a développé plusieurs instruments spécialisés à cet effet.

Une approche optimale requiert de concilier des facteurs contradictoires : sécurité radiologique des opérateurs et sûreté nucléaire d'une part, minimisation des coûts d'autre part. D'où la nécessité de disposer d'informations précises sur la radioactivité d'un site avant de démarrer les travaux. Les systèmes de mesure radiométriques permettent d'identifier et de quantifier à distance la contamination résiduelle et les « points chauds ». Les équipes spécialisées dans la déconstruction peuvent ainsi cibler efficacement les zones à décontaminer et éliminer rapidement les déchets. Le spectromètre gamma à balayage RadScan® 700 a été spécialement mis au point à cet effet. Le développement du prototype a débuté en 1992. Le RadScan® 600, qui avait fait ses preuves lors de scénarios réels de déconstruction, a été lancé en 1996. Les améliorations successives dont il a bénéficié ont permis d'aboutir en 1997 au modèle actuel.

En matière de déconstruction, on distingue plusieurs sources de contamination : les éléments transuraniens, les produits de fission et les produits d'activation. Pour offrir un champ d'application aussi large que possible, les systèmes utilisés doivent donc être capables de mesurer et de différencier le rayonnement gamma associé à chaque source. Les éléments radioactifs détectés sont respectivement le plutonium (rayonnement de 500 keV), le césium 137 (662 keV), et le cobalt 60 (1 173/1 332 keV). Afin de donner la priorité à la détection des produits de fission, il a été décidé de concevoir un système sensible aux énergies gamma comprises entre 100 keV et 1,3 MeV, et optimisé pour 662 keV.

La directivité des photons incidents auxquels sont sensibles les détecteurs est assurée par un collimateur. La conception d'un détecteur exige de réaliser une protection suffisante et quasi uniforme vis-à-vis du rayonnement ambiant, afin de garantir une détection fiable du signal de la source. Techniquement, il s'agit d'optimiser le rapport signal/bruit et l'uniformité de la réponse. De plus, la collimation (ou champ optique) doit demeurer suffisamment étroite pour identifier l'origine de la source, ce qui revient à obtenir une grande résolution spatiale. Enfin, le poids de l'appareil doit rester modéré pour pouvoir être utilisé sur le terrain. Ces différents paramètres étant conflictuels, un compromis doit être trouvé. Quels choix techniques ont été retenus pour le RadScan® ?

Les considérations de poids orientent la conception vers un détecteur de petite taille. Un scintillateur inorganique à base de césium a été préféré à son homologue à base de sodium, en raison de sa densité élevée et de son excellent pouvoir de ralentissement. En outre, la longueur d'onde des pics du spectre d'émission d'un scintillateur à base de césium est très élevée, ce qui rend possible

N.A. TROUGHTON, J.C.B. SIMPSON, R.D. GUNN, G. MOTTERSHEAD
BNFL Instruments

l'utilisation de photodiodes compactes. Enfin, pour maximiser la sensibilité, le volume de scintillateur actif doit représenter une proportion aussi élevée que possible du volume total du détecteur. La prise en compte de toutes ces considérations a abouti à la décision de concevoir un détecteur constitué d'un scintillateur au césium (CsI(Tl)), optiquement couplé à une photodiode compacte au silicium. Il délivre en sortie des impulsions analogiques qui sont traitées par un amplificateur spectroscopique intégré. Le détecteur est placé dans un mince boîtier d'aluminium. Une fois ces choix retenus, il a été possible de finaliser la conception du collimateur. Pour réaliser un collimateur de géométrie idéale, c'est-à-dire sphérique, l'uranium appauvri est un candidat intéressant. Sa densité importante et son coefficient d'absorption du rayonnement gamma très élevé permettent de minimiser le rayon, et donc la masse du collimateur. En revanche, l'uranium appauvri présente certains inconvénients comme une contribution importante au bruit de fond. Finalement, parmi les autres candidats, les essais ont montré que l'alliage de tungstène de densité 18,1 g/cm^3 est le matériau optimal pour la réalisation pratique. Le blindage entourant le détecteur est approximativement sphérique. Un rapport signal/bruit supérieur à l'unité a été obtenu pour une source homogène de 662 keV. Le poids total a pu être maintenu à une valeur permettant à deux opérateurs de soulever l'appareil en toute sécurité. Une caméra CCD couleur électronique de faible coût a été choisie pour l'acquisition des images vidéo pendant les opérations. Au moyen d'un zoom, l'opérateur peut régler à distance le champ optique, la distance focale, et la luminosité de l'image vidéo. Un télémètre laser infrarouge a été installé afin de mesurer à distance l'éloignement des objets. Le modèle retenu garantit une protection maximale des yeux des opérateurs.

L'appareil étant destiné à être manipulé dans toutes les zones à inspecter, il est impératif d'assurer la protection du détecteur, du collimateur, de la caméra, du zoom, et du télémètre, contre toute contamination radiologique. Pour cela, chaque composant est installé dans un compartiment fixe, à l'intérieur de deux boîtiers accouplés en aluminium. Des joints spécifiques garantissent l'étanchéité requise. Cet ensemble est appelé « tête de détection ».

Le contrôle à distance permet le déploiement des instruments dans les zones contaminées

Après déploiement sur le lieu choisi, le système est capable de balayer automatiquement, à distance, son environnement, tout en restant en liaison avec les opérateurs. L'expérience a révélé que les interventions répétées, visant à réorienter le dispositif, limitent sérieusement ses possibilités d'utilisation. Un dispositif panoramique mobile et motorisé très robuste a donc été retenu pour obtenir un balayage automatique. L'ensemble, appelé « tête de contrôle », assure une couverture proche de 360° dans le plan horizontal, et supérieure à 130° dans le plan vertical.

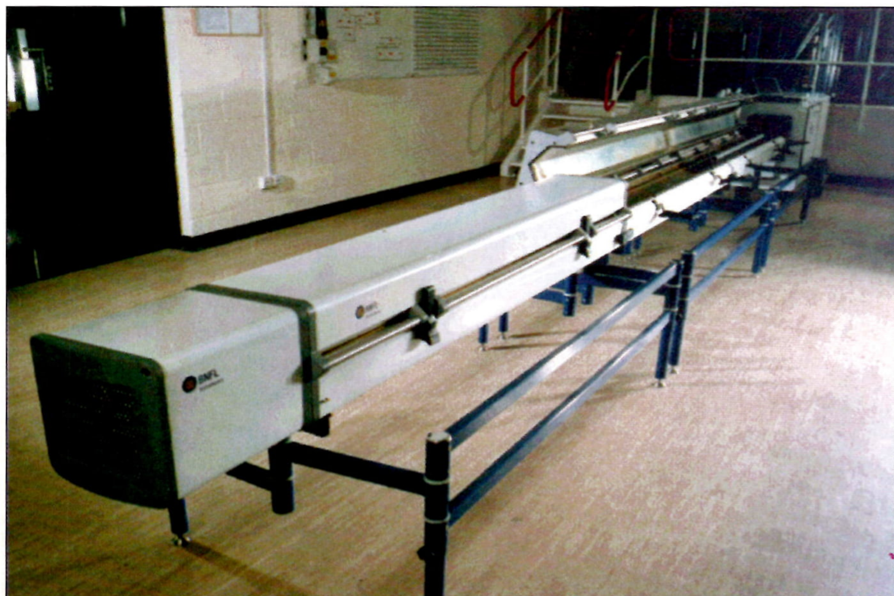
Le poste de travail à distance a été conçu de manière à permettre une maîtrise parfaite de l'ensemble des installations de balayage et d'acquisition de données. Les opérateurs y effectuent également l'analyse des résultats. Le poste se compose principalement d'un ordinateur industriel, d'un écran, d'un clavier et d'un magnétoscope. Le logiciel et les fichiers générés par l'utilisateur sont stockés sur le disque dur de l'ordinateur. Ce dernier contient des cartes mères qui assurent l'intégralité du traitement de données, et l'écran affiche directement l'image transmise par la caméra CCD, ainsi que les principales données géométriques et radiométriques. L'ensemble peut être enregistré sur une cassette vidéo.

Toutes ces qualités ont permis d'utiliser le RadScan® 700 à l'usine nucléaire de Tchernobyl. Il est également utilisé dans diverses autres centrales électriques et installations nucléaires de par le monde.

Une autre catégorie d'appareils développés par BNFL Instruments est destinée à la mesure de la contamination alpha. La portée dans l'air des particules alpha n'excède pas quelques centimètres. La méthode traditionnelle pour détecter ce type de contamination consiste à passer une sonde près de la surface concernée. Cette méthode peut poser des difficultés avec les objets de forme irrégulière ; difficultés qui deviennent quasiment insurmontables dans le cas des canalisations. Duncan MacArthur, Kraig Allander et John Bounds, du laboratoire national de Los Alamos (Etats-Unis), ont inventé une nouvelle technique : le LRAD (Long Range Alpha Detection). Quel en est le principe ? Lorsqu'une particule alpha est arrêtée dans l'air, elle génère des paires d'ions. Sachant que l'énergie de formation d'une paire d'ions dans l'air est d'environ 35 keV, et que la plupart des particules alpha possèdent une énergie de 5 MeV, on peut déduire qu'une particule alpha génère quelque 140 000 paires d'ions. La durée de vie de ces paires d'ions est d'environ 10 secondes. Si l'on parvient à les capter et à les mesurer dans ce laps de temps, il devient possible de déduire la contamination alpha de la surface. Pour capturer les ions formés, un flux d'air balaie la surface de l'objet examiné, puis est acheminé vers un détecteur qui compte les particules chargées.

La mise en œuvre de la technique LRAD a nécessité des travaux de développement complémentaires. Duncan MacArthur a travaillé une année entière dans les laboratoires de BNFL Instruments, à Sellafield (comté de Cumbria), en collaboration avec une équipe multidisciplinaire d'ingénieurs, de physiciens et d'informaticiens, afin de résoudre les différents problèmes d'ordre pratique. En particulier, ils ont apporté la démonstration de fiabilité de la mesure de contamination, et élaboré des méthodes pour supprimer les interférences avec les ions naturellement présents dans l'air.

Examinons quelques points clés de la conception de l'instrument. L'un des premiers éléments à définir a été le type de mesures à effectuer. La façon la plus simple de concevoir un système suffisamment flexible pour s'adapter à l'éventail de dimensions rencontré consistait à utiliser une série de modules interconnectés : le contrôleur de canalisations, et celui d'éléments volumineux IonSens®. Cet appareil se compose de quatre éléments principaux : un module filtrant, une chambre de mesure, un module de



Le détecteur IonSens® (ici le module d'analyse des canalisations) met en œuvre une technique développée au laboratoire de Los Alamos pour la détection des particules alpha.

détection et un ordinateur. L'air pénètre dans l'instrument au niveau du module filtrant. Il traverse ensuite un filtre à hautes performances qui retient l'ensemble des poussières et des particules chargées en suspension dans l'air, afin de se prémunir des interférences extérieures. La chambre de mesure est un caisson étanche à l'air, dans lequel on place l'objet à tester. Plusieurs problèmes de conception se sont posés lors de sa mise au point. Par exemple, cette chambre doit être ouverte, puis refermée, à chaque fois qu'un objet est placé à l'intérieur. La difficulté consistait à obtenir une étanchéité parfaite, sans toutefois utiliser de système de verrouillage encombrant. En outre, une méthode simple pour suspendre l'élément testé a dû être élaborée. Enfin, le cahier des charges imposait d'avoir en permanence une surface d'une propreté irréprochable, afin d'éviter toute contamination accidentelle.

Deux types de chambres de mesure ont été développés. Le premier est un module adapté à des canalisations de 2 m de long. Il est possible d'installer jusqu'à trois modules à la suite, ce qui permet de mesurer des canalisations d'une longueur maximale de 6 m. Un dispositif refoulant le flux d'air au milieu de la canalisation permet de mesurer séparément contaminations extérieure et intérieure. Le second type de chambre est équipé d'un dispositif pivotant, qui permet faire tourner l'élément testé. Il accepte des objets atteignant 1 m × 1 m × 0,8 m. Les dimensions de ce module permettent d'examiner de façon rapide et efficace de nombreux objets métalliques : pompes, vannes…

Le module de détection contient une grille pour collecter les ions, un dispositif de comptage électronique et une sortie pour transmettre les données à l'ordinateur. En aval du détecteur, un filtre retient l'ensemble des ions et des particules présents dans l'air, protégeant les opérateurs de l'air contaminé. Une ventilation très efficace aspire l'air au travers du détecteur et du filtre. La vitesse du flux garantit que les ions situés dans la chambre sont captés pendant leur durée de vie.

L'ordinateur traite les informations de comptage, et en déduit le niveau de contamination de l'élément testé. Au cours du programme de développement, l'efficacité de la collecte des ions a été mesurée pour un large éventail de géométries. Ces mesures sont utilisées comme références dans l'algorithme. De plus, le logiciel vérifie que le système est correctement étalonné, surveille l'état du flux d'air et contrôle l'étanchéité à l'air du système, avant d'autoriser le début des mesures.

Il est possible de configurer l'instrument de manière à ce que la chambre puisse mesurer des niveaux de contamination extrêmement faibles (jusqu'à 5 Bq), et ce, avec les deux configurations (canalisations ou éléments volumineux). IonSens® est donc aussi efficace pour identifier les déchets non contaminés, que pour quantifier la contamination alpha des autres flux de déchets.

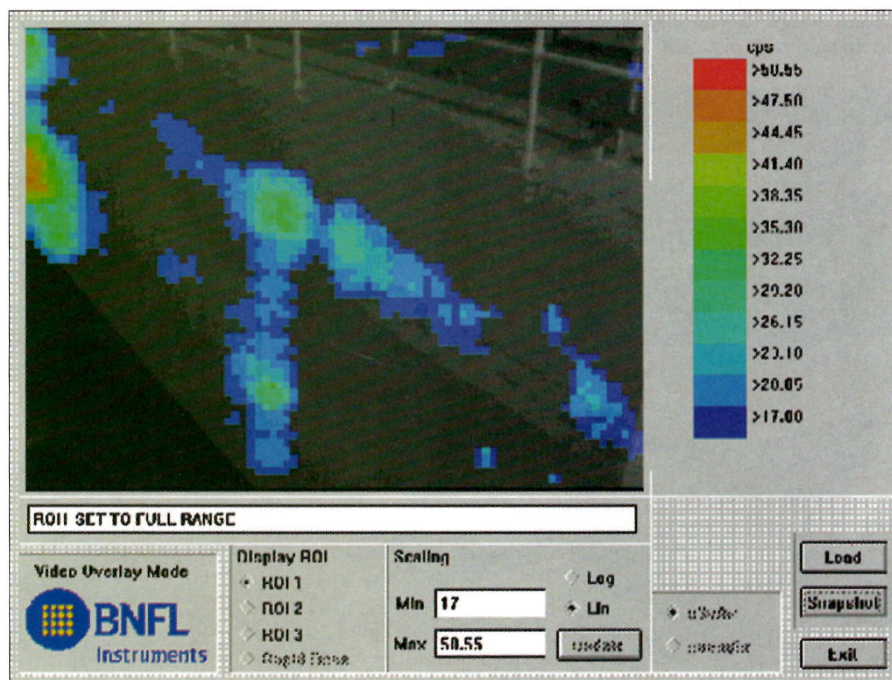
Les appareils que nous venons de décrire ne sont que deux exemples choisis dans une vaste gamme. Les produits développés par BNFL Instruments servent, entre autres, à la gestion des combustibles usés. Voyons maintenant comment les analyses de contamination ont évolué, pour cette application, durant les trente dernières années.

Trente ans d'expérience en conception d'instruments de mesure de la radioactivité

Le contrôle des assemblages de combustibles usés est apparu dans les années 1970, au sein de l'installation qui assurait alors le dégainage des combustibles d'uranium métallique Magnox. Afin de prévenir les dégagements excessifs d'iode 131 pendant la dissolution du combustible usé, l'exploitant de l'usine avait réclamé un dispositif capable de détecter, avant qu'ils ne soient retirés de leur gaine, les combustibles n'ayant pas suffisamment refroidi. En effet, l'iode 131, élément radioactif à durée de vie courte, doit voir son activité descendue à des valeurs acceptables dans un délai de 110 à 130 jours pour que le combustible soit déclaré suffisamment refroidi. Des systèmes de basse résolution à iodure de sodium (NaI) mesurant le rayonnement gamma ont été installés. De type « tout ou rien », ils déclenchaient une alarme lorsque le combustible était encore trop chaud. A l'époque, il s'agissait d'une instrumentation gamma de pointe, adaptée aux applications installées dans l'usine.

En 1976, BNFL s'est lancé dans la conception d'une nouvelle usine, l'unité FHP (Fuel Handling Plant), afin d'élargir ses activités en matière de recyclage du combustible Magnox. Cette installation comporte des équipements de stockage, et des cellules de dégainage automatique du combustible. Forts de leurs précédentes expériences, les concepteurs ont prévu dès le début du projet d'installer un détecteur de crayons insuffisamment refroidis. L'objectif : empêcher le transfert de combustibles ayant refroidi moins de 150 jours vers le processus de dégainage. Une méthode à haute résolution de mesure de rayonnement gamma a été adoptée pour les mesures. Le temps de refroidissement est déterminé d'après le rapport de certains radionucléides tels que le lanthane, le zirconium, ou le praséodyme : $^{140}La/^{95}Zr$ pour une durée inférieure à 150 jours, et $^{95}Zr/^{144}Pr$ pour un temps atteignant 400 jours.

Les déchets, c'est-à-dire les résidus solides provenant des opérations de dégainage étaient à l'origine stockés dans des silos sur le site de Sellafield. Depuis juillet 1990, ils sont traités dans l'usine d'enrobage des déchets EP1 (Encapsulation Plant 1). BNFL Instruments a été chargé de fournir des outils répondant à un critère particulier : la minimisation des pertes de poudre d'uranium dans le processus. Par ailleurs, pour répondre aux réglementations futures, ces instruments devaient également fournir un inventaire complet des radionucléides contenus dans les déchets. C'est ainsi qu'un appareil de détection isotopique des résidus solides, SIM (Swarf Inventory Monitor), a été développé et installé. Il permet d'estimer la masse d'uranium contenu dans les résidus solides directement sur les plateaux de tri des installations de dégainage de Magnox. En cas de dépassement d'une valeur prédé-



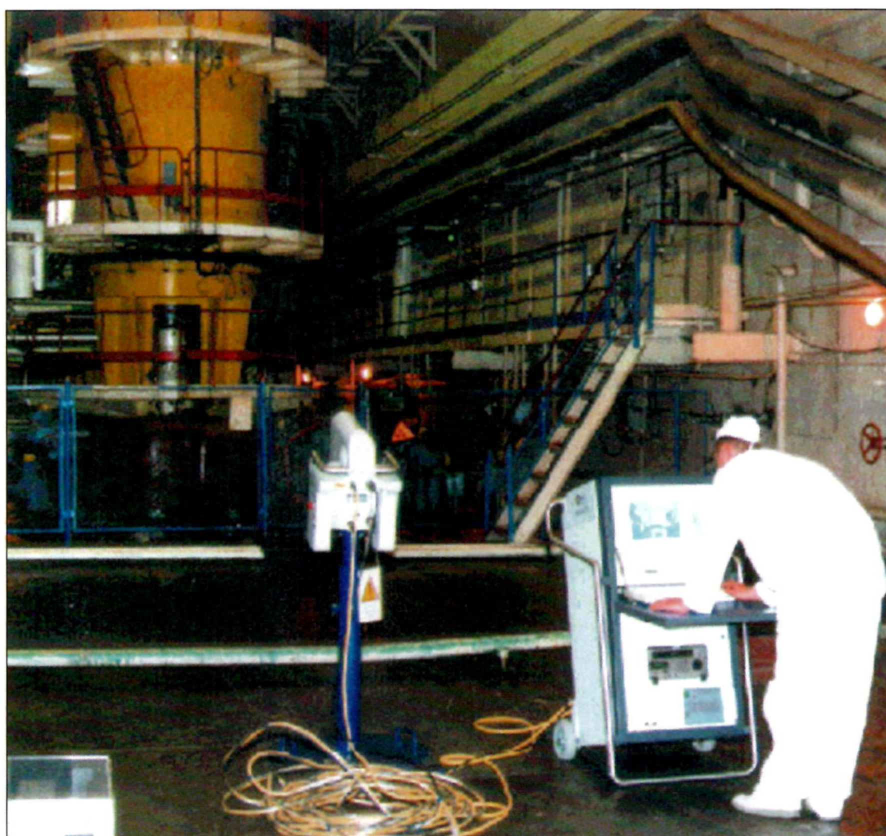
Sur l'écran, l'opérateur observe en temps réel les données mesurées par le RadScan®. Cet exemple montre la contamination dans une piscine de refroidissement de l'usine de Trawsfynydd.

finie, le système émet une alarme. Pendant chaque cycle de mesure, les résidus provenant de quatre crayons de combustible sont contrôlés, et il est possible d'effectuer jusqu'à vingt mesures par heure. Pour chaque bac de résidus exporté vers l'installation EP1, l'instrument dresse un inventaire d'activité pour 44 radionucléides spécifiés. De même que pour le détecteur de crayons insuffisamment refroidis, le SIM effectue les analyses par une mesure à haute résolution du rayonnement gamma, mais en la combinant cette fois à des techniques d'interférométrie. La majeure partie du programme de développement a porté sur les algorithmes d'analyse des données.

La décision de construire une nouvelle usine de recyclage de combustibles sur le site de Sellafield a donné naissance à de nouveaux besoins de contrôle encore plus complexes. Par exemple, le système de surveillance FPFM (Feed Pond Fuel Monitor) a été mis au point pour s'assurer que le combustible arrivant au processus de tronçonnage répond aux critères de sécurité. Ces critères impliquent généralement plus de cinq ans de refroidissement (dans le cas des combustibles provenant des réacteurs à eau légère), une irradiation inférieure à 40 GW/jour par tonne, et un enrichissement initial inférieur à 4 % d'uranium 235.

Comme dans le cas du système SIM, les coques de l'usine Thorp doivent être contrôlées avant transfert vers l'installation de traitement des déchets, EP2 (Encapsulation Plant 2). La mesure est ici rendue complexe en raison des contraintes liées au processus de traitement : les coques* doivent être examinées dans une grande cuve de dissolution qui peut contenir jusqu'à 0,6 tonne de gaines (en Zircalloy ou en acier inoxydable), provenant de trois assemblages de combustible. L'examen des coques est effectif depuis la mise en service de Thorp, en 1994. Il fournit des données vitales pour le contrôle du procédé, la sûreté, et offre les garanties nécessaires quant à la composition des déchets. Le système combine une mesure active différentielle, une mesure passive par flux neutronique et une mesure à haute résolution du rayonnement gamma. Une nouvelle génération d'appareils est aujourd'hui en cours de développement afin de répondre aux problèmes de mesure liés au recyclage des combustibles à oxydes mixtes (MOX), et des combustibles à base d'oxyde d'uranium dont le taux d'irradiation est encore plus élevé.

En 1995, BNFL s'est lancé dans l'exploitation commerciale des outils de contrôle des combustibles avec la création de la filiale BNFL Instruments. En particulier, la caractérisation des assemblages combustibles irradiés à partir de mesures réalisées sur les sites nucléaires offre des avantages économiques majeurs, par une meilleure estimation de la perte de réactivité en raison de l'irradiation. Stockage et transport gagnent ainsi en rentabilité, car il devient possible soit d'accroître la densité de matière dans les conteneurs, soit d'utiliser des conteneurs moins coûteux.



Les performances du RadScan® et ses possibilités étendues d'exploitation ont été mises à profit dans la centrale nucléaire de Tchernobyl.

Des outils pour permettre aux exploitants de réaliser d'importantes économies

La principale technique d'évaluation du taux de combustion est encore la mesure à haute résolution du rayonnement gamma. Le collimateur est immergé dans la piscine de stockage du combustible. Un système mobile de contrôle a été conçu de façon à n'avoir qu'un impact minime sur les opérations normales de l'usine. Sur la période 1996-1997, plusieurs centaines d'assemblages pour réacteur à eau pressurisée ont ainsi été mesurés dans une piscine de stockage aux Etats-Unis. Les objectifs de ces mesures étaient les suivants :

1) démontrer qu'il est possible d'utiliser la mesure à haute résolution du rayonnement gamma pour mesurer le taux de combustion avec un minimum de données fournies par l'opérateur ;
2) produire, à partir des mesures, des documents validant les déductions des taux de combustion ;
3) montrer qu'il est possible de réaliser des mesures pendant une procédure de transfert de combustible d'une piscine de stockage vers l'unité de conditionnement ;
4) Obtenir des données utiles pour l'examen par la Commission de réglementation nucléaire USNRC (US Nuclear Regulatory Commission) de la méthodologie liée à l'évaluation des taux de combustion réalisés.

Depuis, la NRC a autorisé l'usage d'un « crédit de taux de combustion » déterminé par l'évaluation de ce taux, afin de permettre une gestion plus sûre et plus économique des combustibles usés avant leur stockage. Les outils de BNFL Instruments permettent aux exploitants de réaliser des économies conséquentes par la mise en pratique de ce « crédit de taux de combustion ».

Les systèmes d'instrumentation présentés ici ne sont qu'un extrait de l'offre de BNFL Instruments. La société, qui opère aujourd'hui depuis le Royaume-Uni et les Etats-Unis, dispose d'un vaste réseau commercial mondial. Elle continue de développer et d'élargir en permanence sa gamme de produits et de services dans le domaine de l'analyse des matières nucléaires et de la surveillance de l'environnement. BNFL Instruments propose des outils et un savoir-faire spécifiques, destinés aux activités de caractérisation des matières radioactives sur l'ensemble du cycle de combustible nucléaire : mesures des combustibles nucléaires, contrôle des procédés, gestion, garanties de sûreté, analyse des déchets, déconstruction et surveillance de l'environnement. ■

*Morceaux de gaines résultant du cisaillage des crayons de combustible de Thorp.

Répondre à toutes les demandes de l'industrie nucléaire

Internationale, la recherche de BNFL l'est aujourd'hui dans tous ses aspects. Les collaborations avec les universités ou divers organismes de recherche permettent au groupe de rester à la pointe de la technologie. Sue Ion, directrice de la recherche explique la stratégie de BNFL.

ENTRETIEN AVEC SUE ION

Quels sont les principaux axes de recherche de BNFL ?
Ils couvrent tous les domaines du cycle du combustible, depuis la conception de nouvelles centrales électriques jusqu'à l'élaboration de nouvelles technologies de retraitement, en passant par la gestion des déchets et la déconstruction. BNFL est en mesure de répondre à toutes les demandes de l'industrie nucléaire.

Pour quelles raisons avez-vous décidé de travailler pour BNFL ?
Depuis très jeune, je suis passionnée par l'industrie nucléaire. Elle a un côté high-tech qui me fascine. Par ailleurs, j'ai toujours été convaincue qu'elle représente la meilleure source durable d'énergie. A quatorze ou quinze ans, j'ai décidé de suivre une direction me permettant de jouer un rôle actif dans cette industrie, qui me semblait être un projet bénéfique pour l'avenir. J'ai étudié les mathématiques, la physique, et la chimie tout en privilégiant les options ayant trait à l'énergie atomique ou à l'industrie nucléaire. J'ai finalement intégré BNFL en 1979.

Comment s'est déroulée votre carrière au sein de cette société ?
J'ai débuté dans le département de recherche et technologie (R&T), avant d'occuper de nombreux postes, y compris dans les services commerciaux et marketing. Je suis ensuite arrivée au siège en tant que conseillère technique. J'ai pris la tête de la recherche du groupe en 1992. Je suis toujours restée en contact avec la recherche, mais mon expérience commerciale me permet également d'apprécier les questions de coûts et d'investissements. Mon seul regret est de ne plus avoir suffisamment de temps pour le travail en laboratoire !

De quelle manière BNFL a changé durant ces vingt ans ?
Avant tout, cette société du nord-ouest de l'Angleterre est devenue une société d'envergure mondiale. BNFL participe désormais de manière beaucoup plus importante à la production d'électricité nucléaire, et ce tout particulièrement depuis notre fusion avec Magnox Electric. L'acquisition de Westinghouse, l'an passé, nous permet également de participer activement à la conception des réacteurs futurs. Nous sommes par ailleurs considérablement plus réactifs face aux besoins de nos clients. La prochaine privatisation partielle de BNFL renforcera encore notre position. Enfin, nous nous sommes axés sur la sûreté et la protection de l'environnement. Aussi nous cherchons à communiquer autant que possible avec le public à ce sujet, en l'invitant à découvrir sur place nos activités.



Après une formation scientifique et diverses responsabilités au sein de BNFL, Sue Ion dirige la recherche du groupe depuis 1992.

SUE ION
Directrice de la recherche de BNFL

Voici sept ans que vous êtes à la tête de la recherche de BNFL. Comment a-t-elle évolué durant cette période, et quels buts avez-vous poursuivis ?
Quand je suis arrivée, la recherche était fragmentée en petites équipes intégrées aux différents départements de BNFL. Une de mes préoccupations a été de les rassembler au sein d'une seule unité. Nous y sommes parvenus, et les travaux de recherche y ont beaucoup gagné en efficacité. J'ai aussi énormément œuvré dans le but d'investir dans un nouveau centre de recherche. Il est en cours d'achèvement sur le site de Sellafield : les premières équipes sont en train de s'y installer, et il deviendra d'ici quelques années le plus grand centre de recherches du Royaume-Uni.
Nous sommes très fiers de certains succès, comme par exemple le processus intégré de transformation de l'hexafluorure d'uranium en dioxyde d'uranium, élaboré il y a une vingtaine d'années. Il a remplacé un procédé chimique complexe. Plus économique, plus écologique, il est exploité en France et aux Etats-Unis sous licence.
Ces dernières années, un point essentiel de nos programmes a été la recherche en matière de sûreté. Tout particulièrement pour comprendre comment chacun de nos employés aborde son propre travail. Nous avons également souhaité sensibiliser les chercheurs aux aspects commerciaux de leurs travaux, afin de les rapprocher du personnel en charge de ces aspects. Nous voulons arriver à ce que les équipes de qualifications différentes puissent trouver un langage commun, et que chaque programme de recherche puisse déboucher sur des applications concrètes. Enfin, nous poursuivons continuellement notre effort d'internationalisation, et ce, même pour les projets à long terme.

PASSE PAR LA RECHERCHE

Justement, quelle dimension internationale a la recherche de BNFL ?
Les projets internationaux constituent un grand défi. Ils sont extrêmement stimulants pour les chercheurs : ils ont l'opportunité de travailler avec des personnes de culture différente, qui ont des idées différentes. L'industrie nucléaire est une entreprise internationale par nature. De nombreux pays ont, ou ont eu, de grands programmes nucléaires. La collaboration à l'échelle internationale est indispensable en raison des coûts très importants des travaux de développement dans cette industrie. L'unique voie pour parvenir à toujours progresser est de rassembler les capacités intellectuelles et de partager les équipements. BNFL a lancé des programmes dans le monde entier : en Russie, en France, au Japon, ou aux Etats-Unis, notamment pour des travaux de déconstruction et de gestion des déchets.

Pouvez-vous préciser les collaborations que vous menez avec la France ?
Elles sont de deux types. A l'échelle nationale, la France et le Royaume-Uni sont des partenaires de longue date, comme pour le développement de l'European Fast Reactor. Sur des points plus spécifiques, nous collaborons avec le CEA. Par exemple pour des travaux de développement ayant trait au combustible et à la conception des réacteurs.

Quelle est la position de BNFL dans le programme de l'European Fast Reactor ?
Nous sommes convaincus que l'avenir de l'industrie nucléaire passe par les réacteurs à neutrons rapides, même s'il reste beaucoup de chemin à parcourir avant qu'ils atteignent le stade du développement commercial. Ce réacteur est le meilleur concept pour bénéficier d'une source d'énergie durable. Il offre les meilleures solutions pour l'utilisation des déchets recyclés. Pour BNFL, la participation à ce projet est essentielle, en particulier parce qu'il fera appel à des solutions techniques déjà existantes que nous maîtrisons. C'est un exemple typique de projet nécessitant une coopération internationale pour être mené à bien. Il implique des investissements qu'aucun pays ne pourrait faire seul.

Quels changements dans l'industrie nucléaire prévoyez-vous dans les vingt ou trente ans à venir ?
Je pense que nous allons assister aussi bien à des évolutions des techniques existantes, qu'à des changements radicaux. La plupart des usines en fonction aujourd'hui le seront encore dans vingt ou trente ans. Nos propres installations Magnox ont été révisées pour prolonger à quarante ans leur durée de vie. De nombreux exploitants de centrales nucléaires cherchent également à en allonger la durée de vie. Mais nous verrons également apparaître une nouvelle génération de centrales qui pourront répondre aux exigences commerciales actuelles en termes de flexibilité, de modularité et de facilité de construction. Ces critères sont cruciaux pour rentabiliser rapidement les investissements, et s'assurer de répondre aux besoins de chaque pays. Le réacteur AP 600 développé par Westinghouse répond parfaitement à ces nouvelles exigences. Il offre également une bonne illustration des préoccupations en termes de sûreté nucléaire : il démontre que sûreté n'est pas synonyme de complexité, au contraire.
Je pense que l'industrie nucléaire va être reconsidérée par le public et par les dirigeants en termes d'impact sur l'environnement. Les objectifs fixés à la conférence de Kyoto en termes d'émission de gaz à effet de serre dans l'environnement, vont avoir des répercussions favorables sur l'industrie nucléaire, car celle-ci ne produit pas de tels gaz.

Et en termes de recherche, comment voyez-vous l'évolution ?
La technologie ne cesse d'évoluer. De même que pour les autres industries, l'industrie nucléaire tente toujours de capter les nouvelles idées, les nouveaux concepts dans tous les domaines. Nous préparons quelques projets susceptibles de révolutionner plusieurs aspects de nos produits et de nos équipements, et que je ne peux pas encore dévoiler. L'industrie n'est pas un milieu statique, et nous cherchons toujours à attirer des nouveaux talents pour accroître notre créativité. C'est pourquoi nous travaillons très étroitement avec les universités. Il n'est pas intéressant de leur accorder uniquement des financements. Nous recherchons toujours des interactions très étroites, en particulier dans certains domaines tels que la radiochimie.

Comment BNFL parvient-il à attirer et à retenir de nouveaux talents ?
L'apparente stagnation de l'industrie nucléaire pourra être amenée à disparaître si, comme je l'ai évoqué, des décisions politiques sont prises en faveur des objectifs fixés à la conférence de Kyoto. L'opinion change déjà. Il n'y a pas de moyen parfaitement propre pour produire de l'électricité, et le nucléaire est un bon compromis. Dans les trois ou quatre ans à venir, la décision de construire de nouvelles centrales nucléaires pourrait être prise, afin de remplacer celles qui arriveront en fin de vie vers 2020. Cela constituera une nouvelle motivation pour de jeunes ingénieurs. Les contraintes liées au nucléaire réclament une grande créativité dans les étapes de conception. Il faut résoudre de nombreux problèmes spécifiques tels que la nécessité de pouvoir mener les opérations à distance, de concevoir des installations sans entretien, d'assurer une utilisation aisée durant des dizaines années...
De plus, BNFL étant aujourd'hui une compagnie d'envergure mondiale, de grandes opportunités de carrière sont à saisir aux Etats-Unis, en Russie, comme dans le reste du monde.

Le 25 mars 1998 est entrée en vigueur la convention OSPAR pour la protection du milieu marin de l'Atlantique Nord. Comment influe-t-elle sur la politique environnementale de BNFL ?
La commission OSPAR, qui administre cette convention, mène des évaluations quant à l'impact des industries sur l'environnement, et encourage à les minimiser. Nous avons des programmes visant à réévaluer l'effet de nos activités en prenant en compte ces informations. Nous ne cherchons pas seulement à minimiser notre impact sur l'environnement, ce que toute industrie responsable devrait faire, mais nous menons des études très approfondies en amont de tout projet de procédé nouveau, pour retenir celui qui garantit les meilleures garanties en termes de protection de l'environnement. BNFL et les autres industries nucléaires britanniques collaborent avec le gouvernement pour définir la politique environnementale à mener. Après une consultation publique, et la validation du Parlement, la position du Royaume-Uni à ce sujet sera définie, ce qui aboutira à une nouvelle réglementation qui sera susceptible de modifier notre propre politique. BNFL opérant sur de nombreux pays, nous sommes tenus de respecter les réglementations de chaque pays, mais cela cadre parfaitement avec notre politique de responsabilité vis-à-vis de l'environnement.

Quelle est votre plus grande ambition aujourd'hui en tant que directeur de la recherche de BNFL ?
Je souhaite continuer de mener un groupe de talentueux scientifiques pour faire de BNFL le leader mondial de l'industrie nucléaire. Beaucoup de projets sont actuellement menés dans nos laboratoires, je suis impatiente de les voir aboutir à des applications commerciales.

(Propos recueillis par Mathieu Nowak.)

Un nouvel outil de la taille d'un cheveu

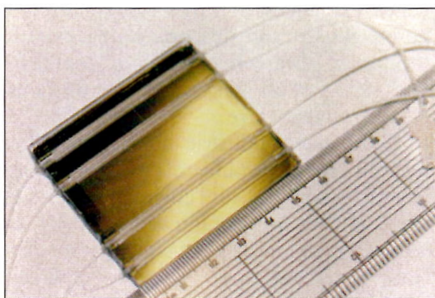
A l'échelle industrielle, les réactions chimiques se déroulent dans des installations importantes. Certaines peuvent désormais être mises en œuvre dans un outil de la taille d'un cheveu. Développé par BNFL pour l'industrie nucléaire, ce microsystème est susceptible de transformer toute l'industrie chimique.

ROBERT DICKSON

Le prestige des travaux accomplis par les ingénieurs chimistes est souvent proportionnel aux dimensions des cuves et des tuyauteries utilisées. Une tendance inverse se dessine aujourd'hui chez BNFL, où l'on affiche avec beaucoup de fierté un morceau de verre à peine plus grand qu'une carte de visite. Il s'agit d'un outil destiné au traitement des flux de déchets.

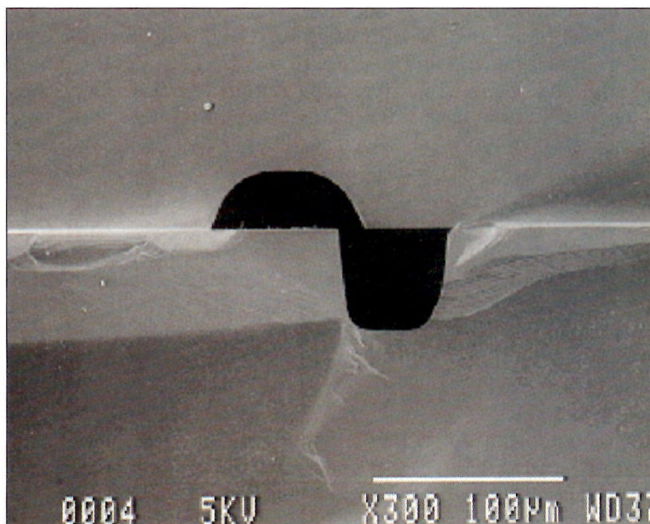
Pour permettre qu'une réaction (ou un autre processus) se produise entre deux liquides, on procède traditionnellement à leur mélange dans des grandes cuves. Le phénomène chimique a lieu à la surface de contact entre les réactifs. Une agitation importante augmente la taille de l'interface. La réaction est alors accélérée, mais cette agitation est coûteuse en énergie. Elle peut également donner lieu à des réactions secondaires. Par exemple, l'un des produits finaux peut réagir avec un réactif chimique présent. Afin de s'affranchir de l'agitation, l'approche adoptée par le génie microchimique consiste à créer une interface soigneusement contrôlée entre deux liquides, en les faisant couler côte à côte dans d'étroits canaux (de la taille d'un cheveu !). Ils entrent alors en contact sans se mélanger.

A première vue, lorsqu'on observe la tranche de verre développée par BNFL, elle semble présenter une technologie simple, avec quatre fins canaux dans lesquels coulent des liquides. Cependant, un examen plus approfondi révèle une bien plus grande complexité. Gravés entre ces canaux, et à peine visibles à l'œil nu, se trouvent plus d'une centaine de minuscules microcanaux,



Sur cette plaque de verre, longue de quelques centimètres à peine sont gravés des centaines de microcanaux où ont lieu des réactions chimiques.

semblables à de petites griffures de la surface. Chacun d'entre eux est en réalité constitué de deux canaux appariés, car la tranche de verre est elle-même formée de deux plaques collées (l'une en verre, et l'autre en silicone). Le canal supérieur, gravé sur la tranche de verre, contient généralement un liquide aqueux ; alors que le canal inférieur, sur la tranche de silicone, contient un liquide organique. Les deux tranches sont soigneusement alignées afin que chaque microcanal chevauche légèrement (sur 10 à 20 microns) celui de l'autre tranche. L'architecture de ce dispositif est déterminée afin que les forces de tension superficielle soient suffisamment fortes pour retenir dans leurs canaux respectifs les liquides. Lorsqu'ils s'écoulent, ils restent en contact sans se mélanger. Ainsi, des processus chimiques — réaction chimique, soit transfert de l'une des substances du milieu aqueux vers le milieu organique, ou inversement — peuvent se produire au niveau de la surface de contact. Une fois que ce processus a eu lieu, les liquides sont séparés et sortent des microcanaux. Dans les procédés chimiques traditionnels, la séparation de deux liquides se fait généralement dans un récipient de grande taille. Cette étape nécessite du temps car il faut attendre que le mélange obtenu décante sous l'effet de la gravité. Dans notre microsystème, les deux flux sortants s'écoulent séparément dans leurs canaux respectifs, si bien qu'aucune étape de décantation n'est nécessaire. La séparation rapide contribue aussi à empêcher les réactions secondaires indésirables. Ce concept, qui reflète une approche radicalement différente des procédés chimiques traditionnels, est protégé par plusieurs brevets internationaux.



Sur ce cliché de microscopie électronique, on voit comment les microcanaux se chevauchent. La surface de contact des liquides mesure à peine quelques microns.

Un transfert aisé du laboratoire vers l'usine

Un canal unique est généralement suffisant pour des travaux analytiques. En revanche, les applications de transformation à grande échelle requièrent un débit important, donc un très grand nombre de canaux placés côte à côte. Une seule tranche de verre peut contenir plus d'une centaine de canaux. Pour accroître encore le débit, plusieurs tranches peuvent être empilées dans les unités industrielles. Outre les avantages déjà cités sur les procédés traditionnels, cette microtechnologie présente de nombreux autres atouts. Le premier est qu'elle est facilement contrôlable, et les réactions peuvent être rigoureusement prévues. L'homogénéité des liquides assure des conditions identiques pour tous les réactifs. De plus, de très faibles quantités de produits sont transformées, ce qui rend le procédé particulièrement sûr lorsqu'il est appliqué à des produits toxiques ou dange-

ROBERT DICKSON
BNFL, Risley.

reux. En usinant les tranches, un dispositif de chauffage ou de refroidissement peut être facilement intégré selon le type de réaction. Enfin, il faut rappeler que les petites installations sont plus rapides à construire, et que leur déconstruction est plus simple et moins coûteuse.

La mise en service des microsystèmes est aisée car les conditions industrielles sont identiques à celles du banc d'essai en laboratoire. Il n'y a donc plus de problèmes de changement d'échelle lors du passage du laboratoire à l'usine pilote, puis à la production industrielle. Les usines utilisent de nombreuses unités en parallèle, si bien que les systèmes sont extrêmement redondants et robustes. Réunis, ces avantages peuvent conduire à un changement important dans la façon de concevoir et de construire les usines chimiques. Les microsystèmes présentent bien évidemment des limites. Par exemple, les minuscules canaux sont rapidement obstrués par des liquides contenant des solides : une étape de filtration préalable est nécessaire, et les réactions faisant intervenir une précipitation ne sont donc pas envisageables. BNFL a développé ces microsystèmes en étroite collaboration avec les Central Research Laboratories Ltd. (CRL), un organisme de recherche indépendant situé près de Londres.

Une technologie transposable à un grand nombre d'applications

En matière de microfabrication et de conception, CRL possède une grande partie de l'expérience requise pour la production des structures de précision. Pour sa part, BNFL a apporté son savoir-faire dans le domaine des systèmes de la transformation chimique dans l'industrie nucléaire. La technologie a pu ainsi être testée pour différentes applications : du traitement du combustible à la gestion des déchets en passant par le traitement des effluents. Nous espérons que les premières démonstrations grandeur nature de la technologie seront effectuées dans le cadre de la proposition de développement que préparent actuellement BNFL, CRL, et une instance gouvernementale américaine qui souhaite appliquer ces travaux au traitement des flux de déchets produits par les sites de décontamination nucléaire d'Amérique du Nord.

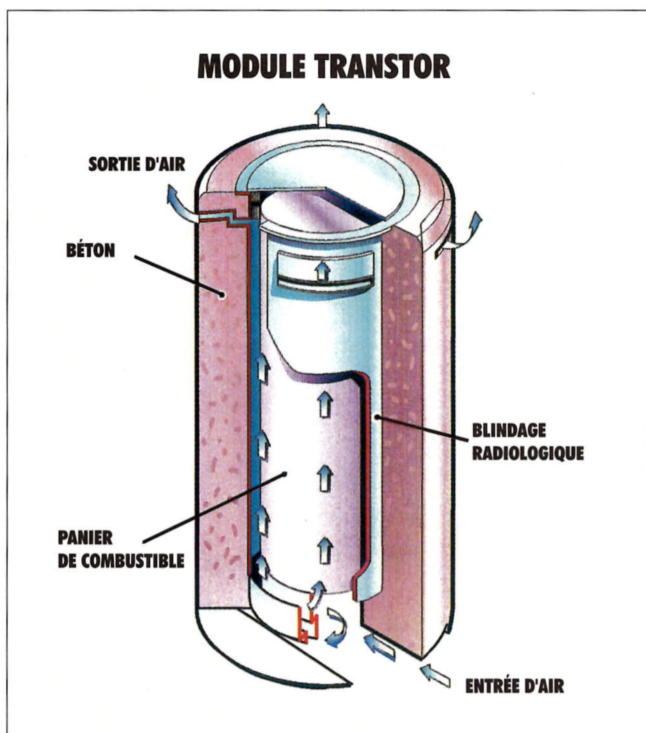
Outre les applications dans le domaine nucléaire, cette technologie pourrait être utile à d'autres industries de transformation chimique, aussi bien en pharmacie qu'en chimie lourde ou en chimie fine. Des installations portables sont même envisageables. BNFL et CRL œuvrent actuellement pour que cette technologie soit appliquée au plus grand nombre de secteurs industriels possible, jetant les bases d'une nouvelle génération d'usines de traitement chimique. ■

Le contrôle à distance du combustible usé

Pour pouvoir être stocké, le combustible nucléaire est placé dans des conteneurs hermétiquement fermés. La surveillance de leur étanchéité doit être effectuée par des méthodes indirectes. Parmi les candidats, le contrôle acoustique représente aujourd'hui la meilleure solution.

P.T. SINGH, J.W. SPENCER, J.R. GIBSON, G.R. JONES

De nombreux contextes industriels réclament de connaître les conditions régnant à l'intérieur d'un conteneur scellé sans y introduire de dispositif de contrôle. Tel est le cas des conteneurs en acier employés pour le stockage du combustible nucléaire usé. *« Nous utilisons le système TranStor™ pour stocker à sec le combustible nucléaire usé : il se compose d'un conteneur en acier inoxydable scellé, dans lequel est stocké le combustible, lui-même placé dans une épaisse enveloppe de béton et d'acier qui protège des radiations »,* explique Bob Dickson, directeur commercial Stockage Intermédiaire, Groupe BNFL Thorp. Le conteneur est fermé par deux couvercles soudés. Le contrôle de l'intégrité des soudures garantit un stockage dans un conteneur parfaitement étanche, pour une période minimale de cinquante ans. Le récipient contient de l'hélium pur. Ce gaz inerte est maintenu à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique, afin de maximiser le transfert de chaleur entre le combustible chaud et la paroi externe du conteneur. *« Bien que le système actuel soit parfaitement conforme à la réglementation, BNFL a décidé de développer une méthode de contrôle de l'atmosphère du récipient, afin d'offrir un niveau de sécurité maximal en termes de maintien de l'intégrité du confinement. Cette méthode ne devait pas utiliser de points de prélèvement, qui auraient affecté la continuité du corps du récipient,*



Dans le module Transtor, le combustible usé est stocké de façon parfaitement hermétique : aucun rayonnement ne peut traverser le blindage. Un circuit d'air assure le refroidissement en permanence.

P.T. SINGH, J.W. SPENCER, J.R. GIBSON, G.R. JONES,
université de Liverpool.

entièrement scellé. D'autre part, il fallait qu'elle puisse détecter les éventuelles entrées d'air dans l'atmosphère d'hélium, en tenant compte de toute variation de température ou de pression de celle-ci, ainsi que l'éventuelle présence d'autres gaz (krypton, xénon, argon), générés par la désintégration du combustible. » poursuit Bob Dickson.

Les ondes acoustiques sensibles aux variations de l'atmosphère gazeuse

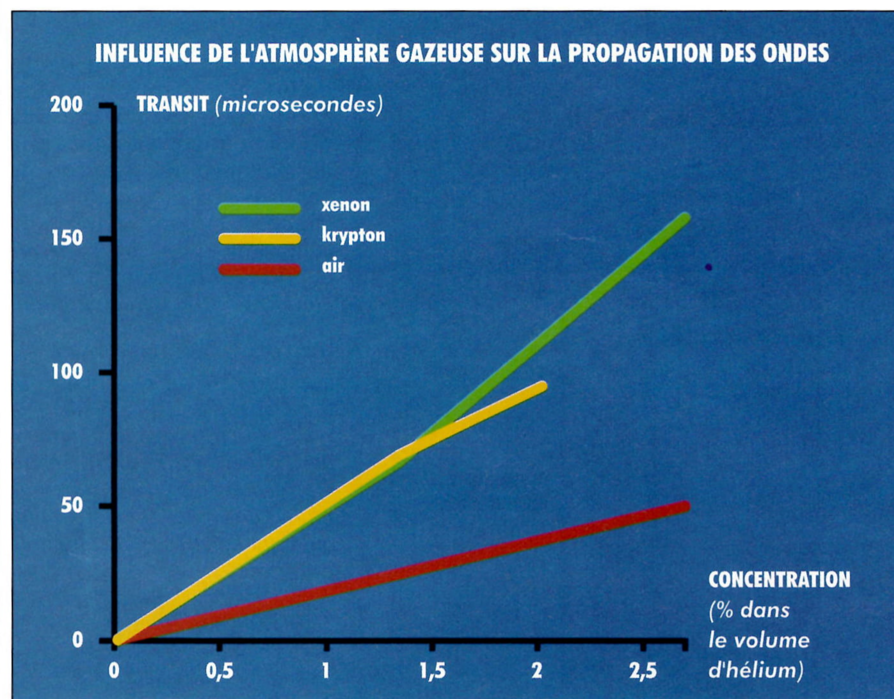
Plusieurs techniques, dites « non intrusives », ont été développées, mais les particularités des conteneurs de déchets limitent les choix envisageables. Les méthodes optiques sont proscrites en raison de l'absence d'accès optique. Les techniques électromagnétiques ne sont pas applicables du fait de leur incapacité à traverser les épaisses parois métalliques du conteneur. Les méthodes utilisant le rayonnement nucléaire ne sont apparemment pas sensibles aux paramètres à contrôler. Les impédances* acoustiques, très différentes de la paroi du conteneur (en acier), du revêtement intérieur (en carbone et en zinc), et de l'hélium, rendent l'emploi des méthodes acoustiques difficile, mais celles-ci restent néanmoins les mieux adaptées. Quel est leur principe ?

Certaines propriétés des ondes acoustiques sont modifiées par la nature de l'atmosphère gazeuse. La vitesse de propagation et l'atténuation sont, en pratique, les paramètres les plus simples à mesurer en raison de leur dépendance à la fréquence de l'onde acoustique (voir figure ci-dessous). Des études fondamentales sur la propagation du son dans les mélanges de gaz concernés — l'air, l'hélium (He), le krypton (Kr), l'argon (Ar), et le xénon (Xe) — ont été menées depuis longtemps(1). Elles montrent que, selon le gaz, les changements de vitesse et d'atténuation suffisent à obtenir une précision de mesure acceptable. Dans la pratique, une variation simultanée de la composition et de la température du gaz peut être détectée à partir de la variation de fréquence acoustique liée à la vitesse et à l'atténuation.

Pour pouvoir mettre en œuvre le contrôle acoustique, trois difficultés pratiques doivent être surmontées. Tout d'abord, les ondes acoustiques subissent une forte atténuation dans l'hélium (en particulier dans les cas d'une propagation de l'onde dite « sphérique »). D'autre part, en raison des différences d'impédances acoustiques évoquées plus haut, une énergie acoustique suffisante doit être transmise, vers l'intérieur du conteneur comme vers l'extérieur. Ces deux effets contribuent à entraver l'obtention d'un parcours acoustique suffisamment long dans le volume du conteneur. Enfin, la troisième difficulté est liée à la manière dont les signaux acoustiques, qui se propagent de préférence dans la paroi du conteneur, interfèrent avec ceux qui se propagent dans l'hélium au sein du récipient.

Afin de surmonter ces difficultés, de nouvelles structures mécaniques ont été conçues : elles permettent de réduire la propagation des ondes dans la paroi, et de mieux maîtriser la longueur de parcours dans l'hélium.

Par exemple, différentes structures (dites en « chapeau ») ont été employées pour le montage de la source acoustique et du détecteur. La comparaison de l'impulsion acoustique incidente, et des signaux détectés, montre que l'on peut en principe extraire des informations relatives au temps de parcours de l'onde et à son atténuation.



Effet de différentes proportions d'air, de krypton, et de xénon, sur le temps de propagation. De faibles niveaux d'impuretés sont non seulement détectables, mais aussi caractéristiques du gaz.

Les techniques d'analyses au secours de la complexité des signaux acoustiques

En raison de l'aspect complexe des signaux acoustiques, des techniques d'extraction d'informations doivent être employées pour observer et exploiter les effets de dépendance à la fréquence. Les méthodes de transformation accélérée de Fourier ne présentent qu'un intérêt limité dans le cas des signaux dont la durée est finie, et le spectre varie rapidement. Il faut donc faire appel à une approche plus polyvalente, fondée sur le traitement chromatique : une forme spécifique de transformée dite de Gabor, développée en exclusivité par l'université de Liverpool(2). Cette méthodologie consiste à traiter les signaux acoustiques complexes à l'aide de trois processeurs à réponse non orthogonale aussi bien dans le domaine temporel que fréquentiel. Ceci permet de caractériser les signaux en termes de fréquence dominante (temps), de largeur de bande effective (durée), et d'intensité nominale. Ainsi, on peut déterminer la variation temporelle de l'intensité (intensité du signal), de l'angle de tonalité (fréquence dominante), de la saturation (largeur de bande), et d'en extraire l'atténuation et les vitesses.

Aujourd'hui, la faisabilité du contrôle non intrusif des conteneurs de combustible nucléaire à l'aide de techniques acoustiques est démontrée. Des méthodologies permettant d'en extraire les informations recherchées ont été mises au point. Deux axes de recherche restent encore à approfondir. D'une part, nous devons mener de nouveaux travaux pour optimiser les géométries de placement des émetteurs et des capteurs de signaux, et, d'autre part, une évaluation plus approfondie des informations extraites des signaux acoustiques doit être réalisée. Le suivi des conteneurs de combustible usé pourra être alors parfaitement assuré tout en maintenant l'intégrité du confinement. ■

*** L'IMPÉDANCE ACOUSTIQUE** est le rapport de la pression acoustique par la vitesse acoustique. Elle s'exprime en Pa.s/m.

(1) G.R. Jones, « *Molecular Energy Transfer in Gases* », PhD Thesis, University of Liverpool, 1964.

(2) P.C. Russell *et al.*, « Extraction of information from acoustic vibration signals using Gabor Transform type devices », *Meas. Sci. Technol.*, 9, 1282, 1998.

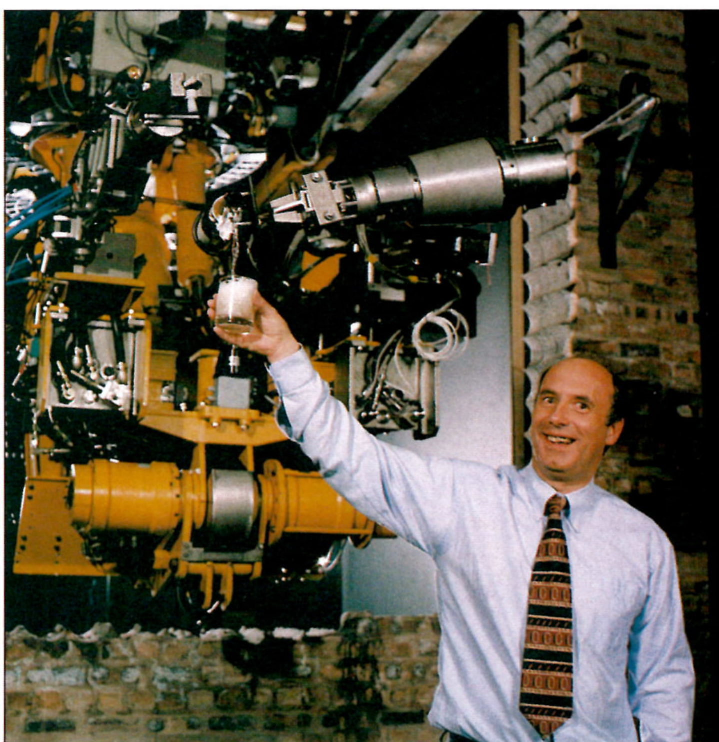
Les applications de la robotique dans les centrales nucléaires

Le phénomène de rayonnement est indissociable de l'industrie nucléaire. Pour protéger les opérateurs, BNFL a conçu des robots ultra sophistiqués qui accomplissent certaines tâches à leur place.

N. COOKE

Un rayonnement ionisant est émis dans toutes les installations comportant ou traitant des produits radioactifs. L'uranium naturel émet, à très bas niveau, un rayonnement alpha. Non pénétrant, celui-ci n'est pas considéré comme problématique lors de la conception et de l'exploitation des installations de traitement de l'uranium. En revanche, des produits de fission et d'activation beaucoup plus radioactifs sont générés dans les réacteurs nucléaires. De hauts niveaux de rayonnement existent, que ce soit dans les réacteurs, ou dans le combustible usé dans les installations de recyclage et de traitement des déchets.

Le personnel doit être protégé et isolé des cuves et des équipements contenant des matériaux irradiant, par l'intermédiaire de barrières blindées. L'épaisseur de celles-ci peut atteindre deux mètres. Dans ces circonstances, qu'il s'agisse d'observation, d'intervention, d'action ou de commande, il est clairement impossible de recourir à des équipements dont la manipulation nécessite la proximité physique d'un opérateur. Cette restriction ne concerne pas uniquement les opérations de routine pour l'exploitation des réacteurs, mais également les activités de maintenance, réparation, modification et déconstruction.



Rodney est un robot capable d'effectuer de multiples tâches : depuis les opérations de démantèlement, jusqu'au service de rafraîchissements !

Avec leurs dispositifs robotiques, les installations fonctionnent sans intervention humaine

Même si les niveaux de rayonnement ne sont pas assez élevés pour interdire totalement l'accès aux installations, les durées d'exposition autorisées sont souvent limitées au point de rendre toute intervention manuelle difficile. Aussi, la plupart des réacteurs modernes, des installations de recyclage et de traitement des déchets sont conçues pour fonctionner sans aucune intervention humaine. Cela a été rendu possible par l'utilisation de dispositifs robotiques capables d'exécuter les opérations de manipulation, maintenance, réparation et remplacement, de façon automatique, ou sous contrôle à distance (voir tableau, p. 58). Les cadences de production dans les centrales nucléaires sont, en général, bien inférieures à celles des installations non nucléaires, où les robots assurent une production en série. En outre, étant donné les contraintes et les environnements très différents dans lesquels évoluent les systèmes robotiques au sein des installations nucléaires, les robots industriels peuvent rarement être directement installés dans cet environnement, sans subir une adaptation préalable. Les fonctionnalités particulières requises dans les applications nucléaires sont obtenues en concevant des systèmes spéciaux de manipulation à distance, souvent montés à partir de composants et d'appareillages robotiques disponibles dans le commerce.

L'intérêt d'utiliser des robots dans les zones à fort rayonnement est partiellement diminué par les complications et les exigences de maintenance supplémentaires qui découlent de leur déploiement. Ces robots comportent en effet de nombreuses pièces mobiles ainsi que des systèmes de commande sophistiqués situés dans des compartiments inaccessibles. Par conséquent, les installations nucléaires sont conçues pour être aussi simples que possible, en minimisant le nombre d'équipements pourvus de pièces mobiles.

Toutefois, même pour les centrales équipées de composants très simples et d'installations de maintenance globale, des situations imprévues se produisent inévitablement, pour lesquelles des fonctionnalités supplémentaires sont nécessaires. Les dispositifs et systèmes robotiques et de téléopération constituent souvent le seul moyen d'intervention efficace dans ces circonstances. Ils sont utilisés pour remplacer les équipements défaillants, réparer les installations de production et les conduites, éliminer les obstructions, effectuer des prélèvements, procéder aux contrôles et aux mesures, ainsi que pour mettre en œuvre des modifications dans les enceintes blindées.

Une solution pour tous les projets de déconstruction et de démantèlement à venir

De nombreux projets de déconstruction (ou de démantèlement) des réacteurs nucléaires obsolètes, des installations de recyclage, ou des installations de traitement des déchets, voient le jour, en particulier en Europe et en Amérique du Nord. Les dispositifs robotiques sont autant de moyens souples, sûrs et efficaces pour étudier, déconstruire, découper, emballer et enlever les matériaux de rebut et les

N. COOKE
BNFL, Risley.



En faisant appel à des robots, des opérations de grande précision, comme ici la découpe d'une section d'un tube en acier inoxydable, peuvent être menées dans des zones de radioactivité élevée.

déchets radioactifs, dans des locaux dont la construction date d'une époque où les normes étaient bien moins strictes que maintenant. Les dispositifs télérobotiques déployés doivent s'adapter à des environnements qui sont souvent ni bien connus, ni totalement caractérisés.

La réussite de la modification d'une usine de recyclage à Sellafield

La modification effectuée dans l'une des usines de recyclage de BNFL à Sellafield, permet d'illustrer plus en détail l'application des techniques de la robotique en environnement hautement radioactif.
Cette opération consistait à enlever une section de conduite dans l'enceinte contenant la cuve de dissolution du combustible nucléaire usé. Un nouveau tronçon de conduite devait être inséré et soudé afin de re-router le liquide à traiter.
Avec des niveaux de rayonnement avoisinant les 5 Sv/heure, toute intervention dans cette zone se devait d'être effectuée à distance. L'accès principal à la conduite devait se faire par un trou de 700 mm, percé dans une paroi de protection en béton de 1,2 m d'épaisseur.
Voici une description du système de re-routage déployé. Il comprend un manipulateur électrique à six degrés de liberté, monté sur un chariot coulissant équipé, sur ses côtés, d'une série d'unités de travail. Les lignes d'alimentation électrique, de commande (moteurs électriques) et de service (capteurs, caméras, éclairage, retour audio, tête de soudage, radiographie aux rayons X, fluides de nettoyage et de refroidissement) de chaque unité de travail sont incorporées dans des câbles spécialement conçus à cet effet. La majeure partie des unités de travail et l'ensemble des systèmes de gestion sont commandés par un automate programmable, installé dans une console d'exploitation. Les unités de soudage et de radiographie, ainsi que le manipulateur possèdent un système de commande séparé, qui est asservi à l'automate programmable.
Le temps de fermeture de l'usine de recyclage pour la maintenance était très court. Il a fallu déployer dans l'enceinte, et rendre opérationnel le système de re-routage avec une grande rapidité. Pour cela, une simulation par ordinateur a permis de définir au préalable la configuration initiale. Des simulations inactives en grandeur nature dans une maquette de l'usine, ont également été menées pour finaliser les détails de l'opération. Le système a ainsi pu effectuer le re-routage dans l'enceinte de dissolution de façon concluante, et dans les délais impartis. ■

RAFFMAN

Le manipulateur RAFFMAN (Raffinate Diverson Manipulator), destiné à la dérivation du raffinat, et son système de commande, ont récemment été installés dans l'usine de recyclage de combustibles Magnox, à Sellafield. Au préalable, une série complète d'essais, exempts de toute intervention manuelle, ont été effectués dans une installation inactive de simulation sur le site de Sellafield.

RAFFMAN a été utilisé pour dériver la conduite de raffinat de la cellule nord de dissolution, vers le nouveau système de colonnes d'épuisement par vapeur de la cellule sud. L'opération a été réalisée selon des procédures de contrôle très strictes, dictées par les niveaux de rayonnement gamma élevés (jusqu'à 2,8 Sv/heure) dans la zone de travail du dissolveur nord. Cet environnement très radioactif s'explique par la contamination résiduelle des surfaces internes ou des canalisations.

En plus de cette dérivation opérée à distance, l'objectif était de transférer les conduites de ventilation du dissolveur, de l'eau de refroidissement, et de circuit vapeur... de la cellule nord de dissolution, vers la cellule sud, puis de boucher définitivement l'accès à la cellule. La simulation de la mise en service de l'installation en zone inactive a pu alors commencer. Celle-ci, accompagnée de mesures de sécurité répondant aux exigences du projet, s'est effectuée sur 30 tonnes d'uranium naturel.

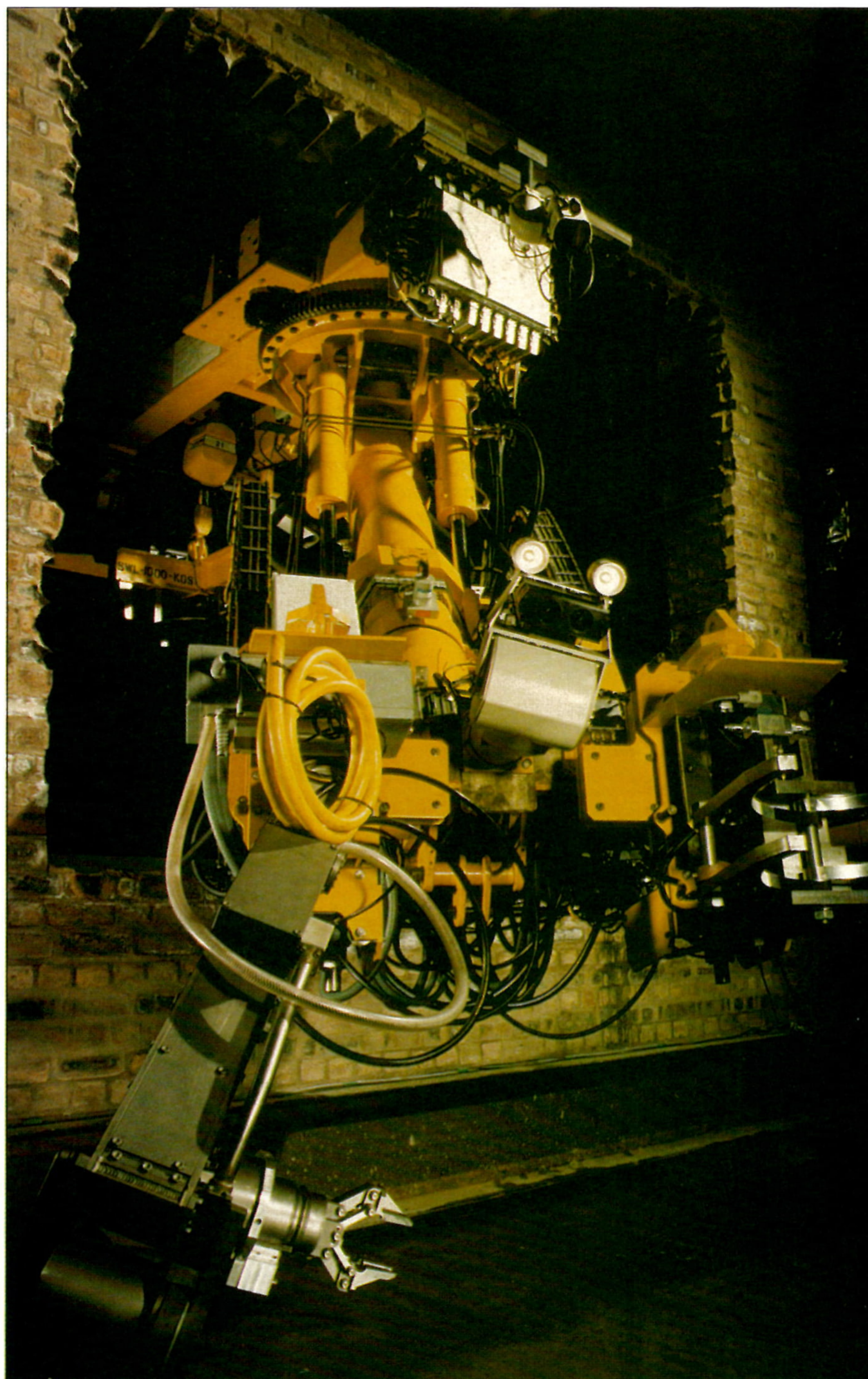
Six mois plus tard, l'inspection des installations nucléaires, la NII (Nuclear Installation Inspectorate), a donné son feu vert pour l'insertion des crayons de combustible dans le « nouveau » dissolveur sud. La cellule sud de dissolution réaménagée assurera l'ensemble des opérations de retraitement du combustible Magnox en attente.

Rodney, le décontaminateur

BNFL possède des compétences reconnues au niveau mondial pour le démantèlement et la déconstruction des installations nucléaires. Ces compétences viennent d'acquérir une nouvelle dimension avec la décontamination d'un bâtiment inutilisé sur le site BNFL de Sellafield, dans le nord-ouest de l'Angleterre.
A première vue, on pourrait penser que le démantèlement de trois petites cellules de l'usine de retraitement BNFL de Sellafield n'est pas une tâche excessivement difficile. Mais depuis plus de quarante ans, personne n'a accédé à ces cellules, situées sur le toit de l'installation de stockage des liqueurs hautement radioactives B212. En outre, les niveaux de rayonnement des lieux en interdisent tout accès. On comprend alors toute la complexité de l'opération.

Un projet d'envergure pour lequel le type d'équipement nécessaire n'existait pas

Le bâtiment en question est l'installation d'extraction de césium, appelé B212. Construit au début des années 1950, il a produit du sulfate de césium, destiné aux applications de radiothérapie, de 1955 à 1958. L'exploitation a ensuite été interrompue à la suite d'une panne des équipements. Depuis, en raison d'une nouvelle préférence pour l'utilisation des sources au cobalt, aucune autre activité n'a eu lieu dans l'installation. Elle a été placée sous un régime de surveillance et de maintenance.
Telle était la situation à laquelle fut confrontée l'unité de récupération des déchets et de démantèlement de Sellafield, dans le cadre du programme de démantèlement en cours. Comme l'explique Mike Parr, le chef de projet : *« Nous savions dès le départ qu'il s'agissait d'un projet d'envergure. Les équipements de l'installation de césium s'étaient beaucoup détériorés depuis l'arrêt de la production, et les relevés effectués à l'intérieur des cellules atteignaient 3 sieverts par heure. Cela nous interdisait toute pénétration. Aussi, nous avons dû imaginer un système nous permettant d'avoir accès aux cellules, et d'extraire les équipements qui se trouvaient à l'intérieur. En simplifiant, nous avions besoin d'une machine capable de traverser le mur extérieur du bâtiment puis, une fois à l'intérieur, d'évacuer des matériels très divers : plinthes en béton, cuves de traitement en acier, équipements de manutention mécaniques ou tubes en verre extrêmement fragiles.*
Nous savions quel type d'équipement il nous fallait. Et nous savions aussi qu'il n'existait pas. »
Mike Parr et son équipe se sont alors lancés dans la conception, la construction et la mise en service des installations spécifiques requises pour ce projet de démantèlement, qui représentait un investissement de trente millions de livres sterling (environ quarante-six millions d'euros). Après quatre années d'efforts, leurs travaux sont aujourd'hui quasi achevés.
Le projet nécessitait de construire un nouveau bâtiment modulaire, abritant la machine de démantèlement destinée à pénétrer dans l'installation de césium. Ce



Dans le démantèlement du bâtiment d'extraction de césium, Rodney a pour mission de traverser le mur puis d'extraire les équipements qui se trouvent à l'intérieur.

module se compose d'une structure blindée, installée dans une ossature métallique de 15 mètres de haut et 15 mètres de côté, et qui forme une avancée de 3,65 mètres par rapport à la façade du bâtiment. Il pèse au total quelque 780 tonnes. Pour permettre l'accès au bâtiment en quatre points différents, le module est monté sur neuf boggies (des chariots à essieux multiples) qui se déplacent sur trois rails parallèles fixés sur une assise en béton. Le module s'amarre à l'avant de chacun des quatre halls d'accès à l'installation de césium.

Des maquettes grandeur nature pour étudier l'ensemble des opérations

« *L'ensemble du projet est articulé autour du rôle de la machine de démantèlement* », explique Mike Parr. « *Mise au point et testée à Lillyhall depuis 1995, elle est actuellement en cours de démontage et de remontage dans le module.*

Nous avons reproduit des installations identiques à Lillyhall afin de nous préparer. Nous avons soigneusement étudié l'ensemble des opérations nécessaires sur des maquettes grandeur nature de l'installation de césium. Les informations ainsi obtenues nous ont permis de développer et de mettre au point les fonctions de la machine. Il faut souligner que celle-ci ne séjourne pas dans l'installation de césium. Elle y pénètre puis se retire à la fin de son programme de travail, vidant une seule cellule à la fois. La seule contamination potentielle est celle provenant des outils et des éventuelles particules en suspension dans l'air, car aucune pièce de la machine ne touche le sol des zones radioactives. »

Le module est équipé d'un plateau tournant capable de contenir seize petits outils et quatre gros outils. Chaque outil est saisi à distance par la machine de démantèlement et, une fois la tâche terminée, placé dans une installation de décontamination qui assure sa maintenance en vue d'une réutilisation ultérieure.

Une fois que la machine a pénétré dans la cellule et a commencé son travail de démantèlement, les matières contaminées sont transférées de l'installation de césium vers des récipients blindés situés à l'intérieur du module. Elles sont ensuite transportées vers d'autres installations du site. Elles y sont alors traitées et séparées en déchets de faible et de moyenne activité, avant d'être expédiées vers le dépôt de déchets divers de rayonnement bêta-gamma, ou vers le site de Drigg.

Le projet a récemment suscité des évolutions inattendues. Comme l'explique Mike Parr : « *BNFL a décidé d'utiliser la machine de démantèlement comme élément central de sa récente campagne de publicité institutionnelle. L'équipe de relations publiques a jugé qu'il fallait modifier l'image de la machine avant de la faire paraître dans la presse nationale.*

Les responsables des relations publiques nous ont demandé comment s'appelait notre machine. Nous avons répondu "machine de démantèlement". "Ce n'est pas un nom", ont-ils rétorqué avant de disparaître quelques instants. "Nous vous proposons Tarquin ou Rodney", ont-ils dit à leur retour. Après quelques secondes de réflexion, nous avons opté pour Rodney. »

Rodney a fait l'objet d'une pleine page de publicité dans la presse nationale et a même été remarqué par les studios Pinewood. Ceux-ci avaient vu l'annonce et souhaitaient utiliser cette machine dans un futur James Bond. Cependant, après la visite du directeur artistique du film, cette solution n'a pas été jugée compatible avec les engagements des deux organisations. Mike Parr estime que c'est finalement mieux ainsi, « *car l'équipe aurait eu de réelles difficultés à expliquer aux clients que Rodney devait prendre six mois de congés pendant le projet* » !

Le robot Rodney a été approché pour jouer dans James Bond !

Après une période de mise en service en zone inactive, le premier trou sera percé dans l'installation de césium en mars 2000. La mise en service en zone radioactive commencera par la pénétration dans l'installation de césium, et se poursuivra par une série d'opérations initiales de démontage. La machine deviendra pleinement opérationnelle une fois qu'elle aura obtenu l'accord de l'inspection des installations nucléaires. Ces activités préliminaires permettront de déterminer la réelle valeur du vaste programme d'essai qui vient de se terminer.

L'entière responsabilité commerciale du projet incombe au Commissariat à l'énergie atomique britannique, pour qui BNFL réalise les travaux selon un contrat forfaitaire assorti de différentes primes.

« *Toutes les grandes étapes ont été mises en œuvre en avance sur le programme. Cela a été possible dès le départ, alors que le projet n'était qu'un concept, grâce à l'implication de tous ceux qui ont pris part au projet, et à l'étroite collaboration mise en place entre les équipes de BNFL et les sous-traitants* », conclut Mike Parr. ■

Les différentes technologies

• SYSTÈMES DE TRANSPORT

Ils sont utilisés pour déplacer, dans les enceintes radioactives, les dispositifs de manipulation, les outils de travail et les systèmes de contrôle.

- Systèmes à base fixe : manipulateurs (bras robotiques) comportant un nombre variable de maillons et d'articulations en fonction de l'espace et de la trajectoire disponibles.
- Systèmes de montée : en général utilisés pour atteindre les surfaces des enceintes et des parois.
- Systèmes mobiles et véhicules : indépendants de l'environnement d'intervention, mais d'une conception et d'une technologie plus complexes en raison de leurs degrés de liberté supplémentaires.

• KITS D'INTERVENTION A DISTANCE

Il s'agit d'adaptations des techniques et des outils traditionnels de maintenance et de construction. Ils ont été développés dans le but d'éliminer les équipements obsolètes et les obstructions, effectuer les réparations et installer de nouveaux éléments.

- Perçage, boulonnage et serrage
- Meulage et soudage
- Eboutage, cintrage, poussage et tirage des conduites
- Découpe au jet d'eau et décontamination
- Positionnement et assemblage de tuyauteries souples et de câbles

• SYSTÈMES NON DESTRUCTIFS DE VISUALISATION, DE CONTRÔLE ET D'ESSAIS

La conception et l'efficacité de l'exploitation d'un équipement robotique sont fonction des connaissances sur l'environnement dans lequel il sera déployé. Etant donné les incertitudes liées au passé d'une installation et les événements imprévus, un contrôle est nécessaire au début de la plupart des projets. Il est opéré par ces systèmes non destructifs.

- Caméras (miniatures ou résistantes au rayonnement selon les cas)
- Sondes vidéo
- Fibroscopes
- Têtes de contrôle aux ultrasons et rayons X
- Outils de prélèvement

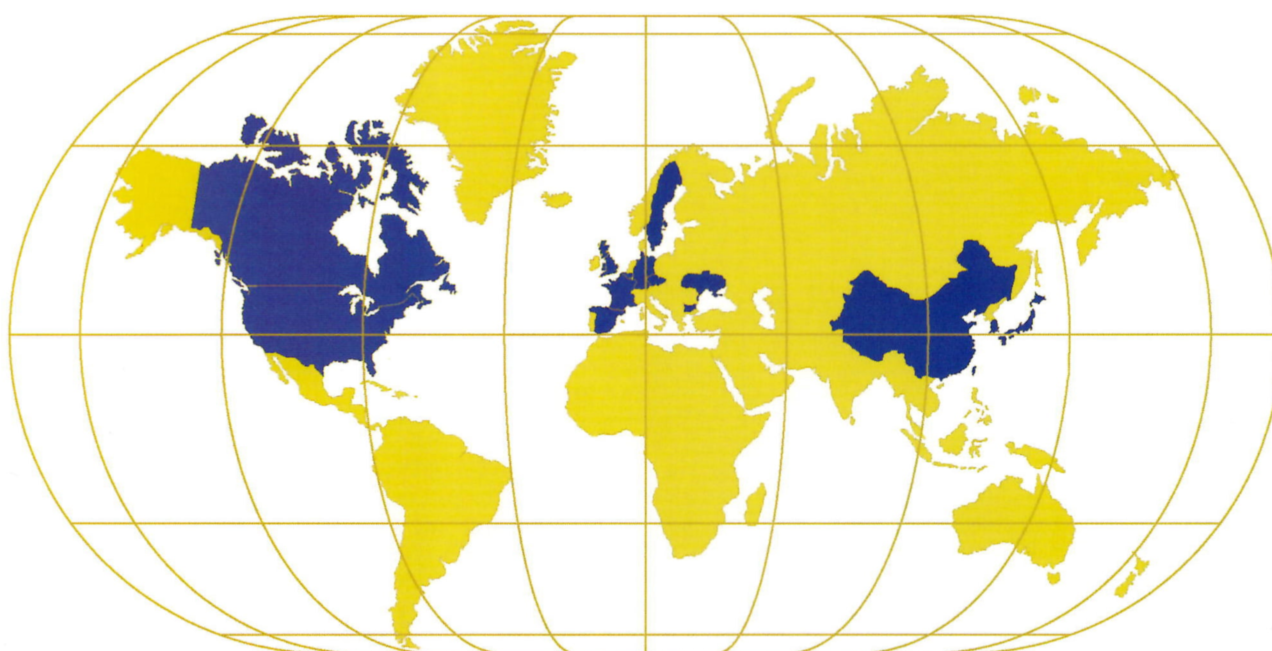
• SYSTÈMES DE COMMANDE

Ils sont inhérents aux applications robotiques. En raison de la complexité grandissante des systèmes de transport et d'intervention à distance, et de leur déploiement dans des situations toujours plus complexes, des systèmes de commande de plus en plus élaborés sont nécessaires. Des méthodologies génériques susceptibles de s'adapter à une large gamme d'équipements ont été mises au point.

- Système modulaire constitué de cartes numériques de contrôle, et d'un mode de supervision et guidage de type PC : il est utilisé par BNFL Magnox pour commander la plupart des nouveaux manipulateurs et véhicules robotisés.
- Techniques de commande adaptative issues de la robotique industrielle combinées à des commandes fournies par l'opérateur : elles répondent à une nouvelle approche de BNFL et de UK RoboticsLimited, pour concevoir des systèmes plus efficaces de téléopération, et de déconstruction.



Une entreprise mondiale



Allemagne
Belgique
Bulgarie
Canada
Chine
Corée du Sud
Espagne
Etats-Unis
France
Japon
République tchèque
Royaume-Uni
Slovénie
Suède
Taiwan
Ukraine

British Nuclear Fuels Plc.

Head office
Risley
Warrington
Cheshire WA3 6AS

Tel: +44 (0) 1925 832000
Fax: +44 (0) 1925 822711

BNFL SA

Immeuble International
2 rue Stephenson
78181 Saint-Quentin-en-Yvelines
France
Tél : +33 (0) 1 39 44 0160
Fax : +33 (0) 1 39 44 0161

Code N° La Recherche/1099

Remerciements : Bill Anderton, Dave Beaumont, Colin Bennet, Dominic Box, Howard Bruschi, Adrian Bull, Al Casadei, Keith Case, Mike Cavanagh, Janine Claber, Rose Cotton, Tracy Croxford, Ed Cummins, Darryl Degelmar, Georges Desaedeleer, Karine Gempeler, Vaughn Gilbert, Edouard Grall, Dave Grundy, Tony Harrison, Louise Haskins, Joe Kazan, Shaughn Kelly, Dick Marshall, John McCartney, Heidi Messenger, Fernando Naredo, Jim Olszewski, Peter Osbourne, Raymond Peschaud, David Powell, Jenanne Price, Jeremy Rycroft, Donat Sicuranza, Malcolm Miller, Stan Price, Chris Warren, Shirley Williams, Michel Zachar,
Un remerciement spécial revient à Emma Rushton, notre chef de projet.
Et un grand merci également à tous ceux dont les textes, bien qu'intéressants, n'ont pu être retenus. La place limitée dans ce supplément nous a obligé à faire des choix parfois très difficiles.

